



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](#)

2021년 2월
석사학위논문

자성 나노유체의 강제 대류열전달에 미치는 자기장 효과

조선대학교 대학원

기계공학과

이아름

자성 나노유체의 강제 대류열전달에 미치는 자기장 효과

Magnetic Effect on Forced Convective Heat Transfer of
Magnetic Nanofluid

2021년 02월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

이아름

자성 나노유체의 강제 대류열전달에 미치는 자기장 효과

지도교수 : 조 흥 현

이 논문을 공학석사 학위신청 논문으로 제출함

2020년 10월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

이 아 름

이아름의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 오 동 욱



위 원 조선대학교 교수 박 정 수



위 원 조선대학교 교수 조 흥 현



2020년 11월

조선대학교 대학원

Contents

Contents	v
Nomenclatures	ix
List of Figures	xi
List of Tables	xiii
Abstract	xiv

제 1 장 서 론 1

제1절 연구 배경	1
제2절 기존 연구	3
제3절 연구 목적	11

제 2 장 실험장치 및 방법 13

제1절 열전도도 측정 장치	13
제2절 강제 대류열전달 측정 실험장치	15
1. 온도 측정	18
2. 압력강하 측정	19
3. 유량 측정	20
4. 열교환기	21

5. Micro gear pump	22
6. Power supply	23
7. 자기장 장치	24
8. 데이터 수집장치	25
제3절 나노유체 제작	26
1. 나노유체 제조 방법	26
2. Fe ₃ O ₄ 나노유체	27
3. Fe ₃ O ₄ /MWCNT 하이브리드 나노유체	29
4. Co _{0.5} Zn _{0.5} Fe ₂ O ₄ 나노유체	31
제4절 실험방법 및 대류열전달계수 계산	33
1. 실험방법 및 조건	33
2. 대류열전달계수 및 불확실도 계산	34
제 3 장 실험 결과 및 고찰	38
제1절 자성 나노유체의 열전도도 측정결과	38
제2절 자기장의 세기에 따른 Fe ₃ O ₄ 나노유체의 강제 대류열전달 실험 결과	40
1. Fe ₃ O ₄ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달계수의 변화	40
2. Fe ₃ O ₄ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nusselt number의 변화	44

3. Fe_3O_4 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 압력강하의 변화	48
제3절 자기장의 세기에 따른 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체 적용 강제 대류열전달 실험 결과	52
1. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달계수의 변화	52
2. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nusselt number의 변화	56
3. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 압력강하의 변화	60
제4절 자기장 세기에 따른 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체 적용 강제 대류열전달 실험 결과	64
1. $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달계수의 변화	64
2. $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nusselt number의 변화	68
3. $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 압력강하의 변화	72
제5절 다양한 자성 나노유체 적용에 따른 강제 대류열전달에 미치는 자기장 효과 비교 분석	76
1. 다양한 자성 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 최대	

대류열전달계수 비교 고찰	76
2. 다양한 자성 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 최대 압력강하 비교 고찰	81
제 4 장 결 론	85
References	87

Nomenclatures

c_p	: specific heat (J/kg · K)
A	: Area (m ²)
w	: Weight (g)
P	: Power (W)
V	: Voltage (Volts)
I	: Current (Amp)
Q	: Heat flow (W)
T	: Temperature (°C)
D	: Inner diameter of test section (m)
L	: Length of test section (m)
h	: Convective heat transfer coefficient (W/m ² K)
m	: Mass flow rate (kg/s)
k	: Thermal conductivity (W/mK)
q	: Heat flux, (W/m ²)
Q_u	: useful heat gain (W)
EG	: Ethylene Glycol
MWCNT	: multi-walled carbon nanotube
Re	: Reynolds number
G	: Gauss (W)

Greeks

ϕ	: Weight concentration, wt%
ρ	: Density, kg/m ³
μ	: Viscosity, kg/ms
ΔP	: Pressure drop, kPa

Subscripts

bf : base fluid (-)
i : inlet (-)
o : outlet (-)
w : Wall temperature
b : Bulk temperature
max : Maximum
min : Minimum
nf : nanofluid (-)
np : nanoparticle (-)

List of Figures

Fig. 2.1 Picture of thermal conductivity measurement	14
Fig. 2.2 Schematic of thermal conductivity measurement	14
Fig. 2.3 Picture of experimental setup	16
Fig. 2.4 Schematics of experimental setup	17
Fig. 2.5 Photograph of T-type thermocouple	18
Fig. 2.6 Photograph of pressure transmitter	19
Fig. 2.7 Photograph of the mass flow rate measurement	20
Fig. 2.8 Photograph of brazed plate heat exchanger (B3-030-10-3.0-HQ)	21
Fig. 2.9 Photograph of Micro gear pump (WT3000-1FA)	22
Fig. 2.10 Photograph of DC power supply	23
Fig. 2.11 Photograph of electro magnetic field generator	24
Fig. 2.12 Photograph of data acquisition system	25
Fig. 2.13 Co-precipitation manufacturing method of Fe_3O_4 nanoparticles	27
Fig. 2.14 TEM image of Fe_3O_4 nanoparticles	28
Fig. 2.15 Pictures of Fe_3O_4 nanofluids	28
Fig. 2.16 TEM image of Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanoparticles	30
Fig. 2.17 Pictures of Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanofluids	30
Fig. 2.18 Co-precipitation manufacturing method of $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ nanoparticles	31
Fig. 2.19 TEM image of $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ nanoparticles	32
Fig. 2.20 Pictures of $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ nanofluids	32
Fig. 3.1 Variation of thr thermal conductivity at the temperature of 25°C under different weight concentration of nanofluids	39
Fig. 3.2 Convective heat transfer coefficient of Fe_3O_4 nanofluid under an external magnetic field	43
Fig. 3.3 Nusselt number of Fe_3O_4 nanofluid under an external magnetic field	47
Fig. 3.4 Pressure drop of Fe_3O_4 nanofluid under an external magnetic field	51
Fig. 3.5 Convective heat transfer coefficient of Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanofluid under an external magnetic field	55
Fig. 3.6 Nusselt number of Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanofluid under an external magnetic field	59
Fig. 3.7 Pressure drop of Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanofluid under an external magnetic field	63

Fig. 3.8 Convective heat transfer coefficient of $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid under an external magnetic field	67
Fig. 3.9 Nusselt number of $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid under an external magnetic field	71
Fig. 3.10 Pressure drop of $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid under an external magnetic field	75
Fig. 3.11 Comparison of convective heat transfer coefficients of magnetic nanofluids according to magnetic field effects	80
Fig. 3.12 Comparison of pressure drop of magnetic nanofluids according to magnetic field effects	84

List of Tables

Table 2.1 Specification of test section	16
Table 2.2 Specification of T-type thermocouple	18
Table 2.3 Specifications of pressure transmitter	19
Table 2.4 Specifications of precision balance	20
Table 2.5 Specifications of brazed plate heat exchanger	21
Table 2.6 Specifications of micro gear pump	22
Table 2.7 Specifications of DC power supply	23
Table 2.8 Specifications of electro magnetic field generator	24
Table 2.9 Specification of data acquisition system	25
Table 2.10 Operating conditions of experiment	33

Abstract

Magnetic Effect on Forced Convective Heat Transfer of Magnetic Nanofluid

Areum Lee

Advisor : Prof. Cho, Hong-hyun

Department of Mechanical Engineering,
Chosun University

In this study, the magnetic field effect on the forced convective heat transfer of water/EG(80:20) based Fe_3O_4 nanofluid, Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanofluid, and $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid was investigated and compared. Magnetic nanofluids were manufactured by a two-step method, and the Fe_3O_4 , $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, and Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanoparticles used in the experiment were prepared using a chemical co-precipitation method. In the Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanofluid, Fe_3O_4 and $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles were mixed in a 1:1 ratio. Besides, the experiment was conducted according to the concentration of nanofluid, Reynolds number, and magnetic field strength,

As a result, the maximum convective heat transfer of Fe_3O_4 nanofluid was observed at the concentration of 0.2wt%. When the Re number was 1600, the convective heat transfer coefficients was 1617, 1643, 1661, 1676 $\text{W/m}^2\text{K}$, respectively, and those were observed at the magnetic strength of 0, 250, 500, and 750 Gauss. Furthermore, the enhancement of convective heat transfer coefficient at the magnetic strength of 250, 500, and 750 Gauss was 1.63%,

2.74%, and 3.66%, respectively, compared to that without magnetic field. Only the $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ hybrid nanofluid exhibited the maximum convective heat transfer characteristics at the concentration of 0.1wt% due to the dispersion stability. When the magnetic field strength was 0, 250, 500, and 750 Gauss at $\text{Re}=1600$, the convective heat transfer coefficient was 1647, 1668, 1677, and 1689 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, respectively. In addition, the enhancement of convective heat transfer coefficient at 250, 500, and 750 Gauss was 1.28%, 1.83%, and 2.55%, respectively, compared to the that without magnetic field. The $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid showed the maximum convective heat transfer performance at a concentration of 0.2wt% as the same with the Fe_3O_4 nanofluid. Similarly, when $\text{Re}=1600$ and the magnetic field strength was 0 Gauss, 250, 500, and 750 Gauss, the convective heat transfer coefficient was 1658, 1681, 1688, and 1701 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, respectively. Besides, the enhancement of convective heat transfer coefficient 250, 500, and 750 Gauss was 1.41%, 1.83%, and 2.63%, respectively, compared to that at 0 Gauss.

When comparing the convective heat transfer characteristics of the three types of magnetic nanofluids, the $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid showed the highest convective heat transfer coefficient. Additionary, it was confirmed that the largest pressure drop was appeared in the $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ hybrid nanofluid, which showed slightly low dispersion stability due to a dispersing two different nanoparticles. Through this study, it is predicted that the performance of the thermal system can improve when the magnetic nanofluid is used as the working fluid in various thermal systems by using the magnetic field. Besides, it can provide basic design data for high efficiency thermal system using various nanofluids.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

세계적으로 에너지 절약 및 환경보호 등을 목적으로 모든 산업분야 전반에서 에너지 효율을 증대하는 기술에 관심을 가지고 있다. 이에 열전달, 변환 및 교환 등 열전달 공정에서의 고효율 기술은 매우 중요해졌으며, 에너지 절약 및 원가 절감을 위해서는 열시스템의 고성능화, 경량화 및 소형화에 초점이 맞추어지고 있다. 현재 열시스템의 효율 증대 기술에는 열교환 면적 증가, 열전달 유로의 난류촉진 및 열전달 유로 크기 감소와 같은 열시스템의 형상, 구조 및 크기를 변형하는 기술들이 주로 연구해 왔으나 이러한 열시스템의 형태 변형은 한계가 있다. 뿐만 아니라 열시스템의 작동유체로 사용되고 있는 물, 오일, 에틸렌글리콜 같은 열전달 유체 또한 낮은 열전도도와 같은 원인으로 열시스템의 효율을 증가시키는데 한계가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 최근 물, 오일, 에틸렌글리콜과 같은 기존의 작동유체에 높은 열전도도 특성을 가지는 나노입자를 첨가하여 작동유체의 열전도율을 향상시켜 열시스템의 효율을 향상시키는 연구가 진행되고 있어 나노유체의 우수성을 보여주고 있다. 나노유체란 기존의 작동유체로 쓰이는 물, 오일, 에틸렌글리콜에 나노입자 또는 나노튜브와 같은 100nm 이하의 나노크기의 입자들을 분산, 부유시켜 만든 유체이다. 나노유체는 1993년 Choi et al. [1]에 의해 처음 발견되었으며, 현재까지 열적특성이 우수한 전열유체로 연구가 진행되고 있다. 이러한 우수한 열적특성으로 나노유체는 산업용 열교환기의 작동유체, 차량용 엔진, 발전시스템의 냉각유체 등 미래의 열전달 작동유체로 부상하고 있다.

최근에는 나노유체를 열적특성을 활성화 시킬 수 있도록 자기장, 전기장 같은 외부 힘을 이용하는데 그 중에서 자성에 영향을 받는 나노유체를 자성 나노유체라고 한다. 자성 나노유체는 자성과 유체의 특성 모두를 나타내는 특별한 부류의 나노유체로 구성된다. 자성 나노유체에 사용되는 자성 나노입자는 철, 코발트, 니켈 산화

물인 Fe_3O_4 , 스피넬 타입 페라이트(spinel type ferrit)등과 같은 금속재료로 부터 다양한 크기와 형태들로 이뤄진다. 기존의 금속 나노유체 중 자성 나노유체를 적용하고 외부 자기장을 통해 대류열전달 특성을 보다 활성화 할 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 우수한 열적 특성 때문에 많은 연구자들에 의하여 자성 나노유체의 열적특성과 대류열전달 특성에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

제 2 절 기존 연구

나노유체를 적용한 대류열전달 특성에 관한 기존 연구들은 주로 원형 관내에서의 강제 대류열전달에 관하여 연구를 진행하거나 실체가 사용되는 열교환기에 나노유체를 적용하여 대류열전달 특성을 실험적으로 연구하는 내용이 주를 이루고 있다. 또한 다양한 조건에서 대류열전달 특성을 연구하기 위하여 Reynolds number, Nuseelt number 및 입구 온도 변화에 따라 실험을 통하여 얻어진 결과를 분석하였다. 따라서 다양한 조건에서의 대류열전달 특성에 관하여 연구하기 위해서는 실제 나노유체의 점도, 열전도도, 비열과 같은 열적특성을 파악하고 있어야 하며, 실제 실험 조건과 오차가 거의 없어야 하기 때문에 실험조건을 설정하는 것에 유의하여야 한다. 또한 다양한 실험에 사용되어지는 나노유체는 대표적으로 Al_2O_3 , CuO , TiO_2 , CNT 등이 있으며 최근에는 2 가지 이상의 나노입자를 분산시켜 하이브리드 나노유체를 제조하여 각각의 나노유체가 가진 특성을 시너지 효과를 통해 향상시키고 이를 이용하여 대류열전달 특성을 향상시키는 연구들이 활발히 진행되고 있다.

먼저 단일 나노유체를 적용한 강제 대류열전달 연구들을 살펴보면, Yu et al. [2]은 Lattice Boltzmann method을 이용하여 마이크로 채널 내 Al_2O_3 나노유체의 유동 및 열전달 특성에 관하여 연구하여 평균 Nu 수가 Reynolds number 와 나노유체 농도가 증가함에 따라 증가하는 것을 확인하였으며, 유체 온도 분포 또한 기존유체인 물보다 나노유체를 사용했을 때 균일함을 확인하였다. Yang et al. [3]은 Lattice Boltzmann method(LBM)을 사용하여 마이크로 채널에서의 Al_2O_3 /water나노유체의 강제 대류열전달 형상을 모델링하였고 기존의 CFD 연구와 일치하며, LBM이 유망하다는 것을 확인하였다. Heris et al. [4]은 일정한 온도의 관내에 Al_2O_3 나노유체를 층류 강제 대류열전달을 실험적으로 조사하였으며, Al_2O_3 나노유체를 적용하였을 때 열전달이 향상됨을 확인하였다. Hu et al. [5]은 Solar salted 기반의 Al_2O_3 나노유체를 적용하여 강제 대류열전달에 관하여 연구 하였고, 질량 분율이 증가함에 따라 비열과 열전달계수가 증가하였으며 2wt% Al_2O_3 나노유체에서 각각 12.3%와 7.26%

향상됨을 확인하였다. Agarwal et al. [6]은 semi-cryogenic rocket thrust chamber 에 kerosene-alumina nanofluid의 사용 가능성을 확인하기 위해 열전달 특성에 대해 실험적 연구를 진행하였을 때, 순수한 kerosene에 비해 나노유체는 높은 열적 특성과 열전달계수 증가가 나타났다. 또한 나노입자의 크기가 작을수록 높은 열적 특성을 나타냈으나 열전달계수는 나노입자의 크기가 클수록 높게 나타남을 보고하였다. Yu et al. [7,8]은 다양한 나노유체의 난류에서의 열전달 특성을 검토하여 나노유체의 열전달 성능 향상에 대한 영향을 확인하였고, Therminol 59 기반의 CuO 나노유체의 열전달에 관한 연구를 진행했으며, 고온의 경우, 저농도(<2.00 vol.%)의 나노유체에서 열전달 향상이 최대 18% 향상됨을 확인하였다.

이와 더불어 Fotukian 과 Esfahany [9]는 CuO 나노유체를 적용하여 열전달과 압력강하의 특성에 관하여 실험적으로 연구를 통하여, CuO 나노유체 열전달계수는 물 대비 평균적으로 25% 증가되며, 압력강하 또한 20% 향상되는 것이 나타났다. Mehrjou et al. [10]는 CuO 나노유체를 적용하여 난류 조건에서의 대류열전달 특성을 실험적으로 연구하였으며, 실험 결과 0.2vol% CuO 나노유체에서 대류열전달계수가 물 대비 10.3% 증가하는 것이 나타났다. Sundar et al. [11]은 동일한 조건에서 0.6vol% Fe₃O₄ 나노유체를 적용 했을 때 기존의 작동유체인 물을 적용 했을 때보다 열전달계수와 마찰계수가 각각 31%와 10% 향상되었다. Sha et al. [12]은 Fe₃O₄/Water 나노유체를 적용하여 대류열전달 특성에 대해 연구를 진행 하였으며, 증류수를 사용하는 경우보다 Fe₃O₄ 나노유체의 열전달 성능이 증류 조건에서는 1.2%~2.3%, 난류 조건에서는 4.7%~5.6% 향상됨이 나타났다. Sheikholeslami et al. [13]은 유한요소법을 이용하여 Fe₃O₄-water 나노유체의 강제 대류열전달 특성에 대하여 연구하였다. Kumaresan at al. [14]은 Water-Ethylene glycol(70:30)기반 각각 0.15vol%, 0.30vol%, 0.45vol% MWCNT 나노유체를 적용하여 열전달 특성을 연구하였으며, 0.45vol% MWCNT 나노유체에서 최대 대류열전달계수가 나타남을 확인하였다. Gupta et al. [15]은 MWCNT/Water 나노유체를 적용하여 강제 대류열전달 특성을 실험적으로 연구하였으며, 0.5wt% 농도의 MWCNT 나노유체를 0.232 m/s로

작동시켰을 때 물보다 최대 열전달이 77.6%로 향상됨을 보고하였다.

Ilhan 과 Ertürk [16]는 hBN-water 나노유체를 적용하여 층류에서의 대류열전달 계수 특성을 연구하였으며, 실험 결과 각각 0.1wt%, 0.5wt%, 1wt% hBN-water 나노유체에서 대류열전달계수가 물 대비 각각 7%, 10%, 15% 향상됨이 나타났다. Qi et al. [17]은 liquid metal gallium 기반의 Ag 나노유체의 대류열전달 형상에 대해 LBM 을 이용하여 모델링 하였으며 나노입자의 크기가 감소할수록 Nusselt number가 증가함을 확인하였다. 뿐 만 아니라 TiO₂ 나노유체를 이용한 대류열전달 과 압력강하의 특성을 연구로 진행되었으며, 실험 결과 TiO₂ 나노유체의 대류열전달계수가 기본 유체의 열전달계수보다 약 6%-11% 더 높은 것으로 나타났으며, 또한 나노유체의 농도가 증가함에 따라 압력강하가 증가하여 최대 25% 향상됨이 나타났다[18, 19]. Ashrafmansouri et al. [20]은 물 기반의 silica 나노유체를 첨가한 tert-butanol 을 온도와 농도 변화에 따른 확산계수 (tracer diffusion coefficient)를 측정하여 10% 이내로 미세대류의 향상을 확인하였다.

Mikkola et al. [21,22]은 고체-액체 상변화 입자를 함유하는 나노유체의 대류열전달 성능을 연구하였으며, 더 나아가 나노입자 크기 및 열전도도와 같은 입자 특성이 대류열전달에 영향을 미치는지 조사하기 위하여 각각 polystyrene, SiO₂, Al₂O₃ 그리고 micelles과 같은 다양한 종류의 입자의 적용한 나노유체를 실험적으로 연구하였으며 나노입자의 크기가 작은 나노유체가 대류열전달 응용에 바람직하다는 것을 나타냄을 보고하였다. Saarinen et al. [23]은 decane과 micelles 나노유체가 난류 영역에서의 대류열전달 특성을 실험적 연구를 하였으며 높은 Re 수 일 때 Nusselt number가 최대 15%까지 향상됨을 보였다. Jarahnejad et al. [24]은 Al₂O₃와 TiO₂ 나노유체의 농도와 크기 및 계면활성제 첨가의 영향에 따른 점도 특성을 실험적으로 연구하였고 온도가 증가함에 따라 점도가 감소되며, 계면활성제의 첨가로 나노유체의 분산안정성을 확보가 되었으나 점도가 증가됨을 확인하였다.

최근에는 단일 나노유체 뿐만 아니라 두 종류의 나노입자를 분산시켜 시너지 효과를 나타낼 수 있도록 제조한 하이브리드 나노유체를 적용한 연구들이 진행되고

있다. 이와 관련된 대표적인 연구들을 살펴보면, Suresh et al. [25]은 Al_2O_3 -CuO 하이브리드 나노유체를 적용하여 열전달 연구를 진행하였으며, 실험 결과 열전달율의 최대향상은 Reynolds number가 1730 에서 Nusselt number가 13.56% 향상됨을 확인하였다. 또한 0.1% Al_2O_3 -CuO 하이브리드 나노유체가 0.1% Al_2O_3 나노유체에 비해 마찰계수가 크다는 것을 보고하였다. Yarmand et al. [26] GNP-Pt 하이브리드 나노유체의 마찰손실과 열전달 성능을 연구하였고, 0.1wt% 농도에서 DI-Water 대비 약 30%의 최대 Nu 수 향상율이 나타났으며, 마찰계수 또한 10%의 최대 향상율이 나타남을 확인하였다. Ahammed et al. [27]은 Thermoelectric cooler와 결합된 열교환기에서 graphene-alumina 하이브리드 나노유체를 적용하여 엔트로피 생성에 대해 분석했으며 냉각 용량 및 성능계수가 17.32% 향상됨이 나타났다. Hussien et al. [28]은 MWCNTs/GNPs 하이브리드 나노유체를 적용하여 강제 대류열전달 특성에 대해 실험적으로 연구하였으며, 0.25 MWCNTs/0.035 GNPs 하이브리드 나노유체에서의 대류열전달계수가 최대 43.4% 향상되었으며, 압력강하가 11%의 향상됨을 보고하였다. Han et al. [29]은 Poly Alpha Olefin (POA)기반의 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CNT 세가지의 나노입자를 첨가하여 나노유체를 제조 하였으며 이를 통해 기존의 유체 대비 열전도도가 21% 향상되는 것을 확인하였고 Khosravifard et al. [30]은 물과 프로필렌 글리콜 50:50의 혼합물에 TiO_2 와 CNTs를 현탁하여 열적특성을 연구하였으며, 나노유체의 열전도율은 기존유체보다 향상됨을 보여주었다. Chen et al. [31]은 Ag/MWCNT 나노유체를 제조하였으며 MWCNT 단일 나노유체와 비교하여 더 높은 열전도성을 나타냄을 보고하였다. Baghbanzadeh et al. [32]은 silica/ MWCNT 하이브리드 나노유체의 유동 특성에 대해 단일 나노유체와 비교 연구하였으며 각각의 silica 및 MWCNT 단일 나노유체 보다 silica/MWCNT 하이브리드 나노유체가 물의 유동특성에 더 영향을 미치는 것을 확인하였다. Sundar et al. [33]은 MWCNT/ Fe_3O_4 하이브리드 나노유체를 적용하여 열전달 및 마찰계수에 관하여 연구하였으며, 농도가 0.3vol% 일 때 Nusselt number 향상이 32.7%로 최대 향상이 나타남을 보고하였다. Huang et al. [34]은 Al_2O_3 와 MWNCT를 분산시킨 하이브리드 나노유체의 압력강하 및 열전달 특성에 관하여 실험하였다. 실험 결과 열전달계수는 Al_2O_3 단일

나노유체 보다 높았으며 압력강하는 작게 나타나 열전달 응용에 유용하다는 것을 확인하였다.

최근에는 외부 자기장을 통해 나노유체의 열전달 특성을 활성화 하는 연구들이 진행되고 있으며, 자기장의 영향을 받는 나노유체를 자성 나노유체라고 한다. 자성 나노유체란 자철석, 마그네슘 또는 철을 함유한 나노크기의 입자를 기존의 유체(물, 오일, 에틸렌글리콜)에 분산시킨 유체이다. 높은 열전도도 특성뿐만 아니라 자기 반응을 통해 대류열전달을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 기대되고 있다.

자성 나노유체를 적용한 강제 대류열전달 특성에 미치는 자기장 효과에 관한 연구들을 살펴보면, Sha et al. [35,36]은 Fe_3O_4 나노유체의 대류열전달 특성에 대한 자기장의 영향을 실험적으로 연구하였다. 그 결과로 부피분율이 3%이고 $40^\circ C$ 온도에서 자기장이 0 Gauss 일 때 증류수 대비 증류 영역에서 1.2%~2.3%, 난류영역에서 4.7%~5.6% 대류열전달계수가 향상 되었고 Fe_3O_4 나노유체가 자기장의 세기가 일정한 800 Gauss 일 때와 gradient magnetic field 일 때 자기장 없을 때 보다 열전달계수가 각각 4.2%와 8.1% 향상 된 것을 실험을 통해 확인하였다. Amani et al. [37]은 Test section에 금속 폼을 설치하여 Fe_3O_4 나노유체의 대류열전달 실험을 진행하였고, 실험 데이터를 정확하게 예측하기 위해 실험 조건과 자기장 세기에 따른 Fe_3O_4 나노유체의 새로운 상관관계를 제안하였으며 자기장 세기가 200 Gauss 일 때 대류열전달계수는 최대 23.4% 향상됨을 보고하였다. Bennia와 Bouaziz [38]은 CFD 모델링을 통해 자기장 영향을 받은 Fe_3O_4 나노유체의 난류에서의 강제 대류열전달계수를 확인하였으며, Nusselt number와 마찰계수의 검증은 L. Sunder의 실험결과와 비교하였으며 서로 일치함을 확인하였다. Sheikholeslami et al. [39,40]은 외부 자기장이 존재하는 환경에서 움직임이 있는 벽 내부와 타원형 실린더에서의 Fe_3O_4 나노유체 흐름을 시뮬레이션을 통해 해석적으로 연구하였으며 이를 통해 Reynolds number가 증가할수록 열전달은 개선되지만, Hartmann 수가 증가하면 열전달이 감소하는 경향을 확인하였다. Esmaili et al. [41]은 solvothermal method으로 Fe_3O_4 나노유체를 제조하였으며 외부 자기장이 흘렀을 때 자성 나노유체 열전달 특성이

크게 개선된 것을 관찰하였다.

Bahiraee et al. [42]은 사각형 채널에서 Fe_3O_4 자성 나노유체의 대류열전달 특성에 대해 모델링 했으며 4개의 자석을 사용했다. 해석 결과 4개의 자석을 적용했을 경우 자기장이 없을 때 Fe_3O_4 자성 나노유체와 증류수를 적용했을 때 보다 평균 대류열전달계수가 각각 약 40.8%와 58.2% 향상됨을 보고하였다. Dogonchi과 Hashim [43]은 물결 모양의 원형 실린더와 마름모로 구성된 새로운 형상에서의 나노유체 대류열전달 특성을 연구하였으며 나노입자의 형태 또한 열전달 향상에 영향을 주는 것으로 확인하였다. Sun, et al. [44]은 자기장을 받는 원형튜브에서 Fe_3O_4 자성 나노유체의 대류열전달 특성을 실험적 연구를 진행하였으며 0.5vol% Fe_3O_4 자성 나노유체가 Re 수가 1080의 환경에서 자기장의 세기가 각각 415 Gauss와 700 Gauss 일 때 Nu 수가 4.36%, 7.19% 향상되었다. Mehrali et al. [45]은 Graphene/ Fe_3O_4 하이브리드 나노유체를 적용하여 대류열전달 및 엔트로피 생성에 대해 분석하였고, 국소 대류열전달은 최대 82% 향상되었으며 총 엔트로피 생성 속도는 증류수에 비해 41% 까지 감소함을 보고하였다. 또한 Shahsavari et al. [46]은 일정한 자기장에서 Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체를 적용하여 층류에서의 강제 대류열전달 실험을 진행했으며, 동일한 Reynolds number가 548일 때, 0.5vol% $-Fe_3O_4$ /1.35vol%-MWCNT 하이브리드 나노유체에 대해 자기장이 없는 경우 대비 Nusselt number가 최대 20.5% 향상됨을 보고하였다. Alsarraf et al. [47] 또한 Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체의 층류에서의 강제 대류열전달 실험을 진행했으며 실험결과 Re 수가 500일 때 0.9vol% Fe_3O_4 /1.35vol% MWCNT 하이브리드 나노유체가 자기장이 없을 때 대비 Nu 수와 압력강하가 각각 109.31%와 25.02% 향상됨을 보고하였다.

Shi et al. [48]은 Fe_3O_4 자성 나노유체를 직선튜브에 사용하여 자기장 영향에 따른 열전달 증가성을 확인하였다. 실험 결과 자기장이 없는 경우 평균 열전달 효율은 12.2%이고, 자기장 영향에 따라 30.2%이상 향상됨을 확인하였으며 Ghandoor et al. [49]는 Fe_3O_4 나노입자의 합성과 물리적 특성에 관하여 연구하여 Fe_3O_4 나노입자의

자성 특징을 확인하였다. Gao et al. [50]은 외부 자기장 영향에 따른 층류에서 Fe_3O_4 나노유체의 대류열전달 및 유동 저항에 관한 연구를 진행하였으며 자기장 강도가 600 Gauss, 나노유체의 농도가 2vol%, 레이놀즈 수가 2000일 때 열전달 및 유동저항이 각각 11.7% 및 5.4% 증가함을 확인하였다. Goharkhah et al. [51]은 heated tube에 Fe_3O_4 나노유체를 적용하여 강제 층류 대류열전달에 대한 일정한 자기장 영향에 관하여 실험적으로 연구하였으며 자기장이 없는 경우 2%의 Fe_3O_4 나노유체를 적용했을 때 Re 수 1200에서 Di-water 비해 대류열전달이 최대 13.5% 향상되었으며, 동일한 농도로 2%의 Fe_3O_4 나노유체에 500 G의 자기장 세기를 적용하면 18.9%에서 31.4%까지 증가함을 확인하였다. Nkurikiyimfura et al. [52]은 자성 나노유체의 열전도도 모델을 통하여 자기장에서의 자성 나노유체 효과를 조사하였으며, 일정한 자기장에서 자성 나노유체는 자기장에 따라 열전도 성분이 크게 향상됨을 확인하였다. Ghofrani et al. [53]은 외부 자기장이 있는 구리 관에 Fe_3O_4 나노유체의 강제 대류열전달에 대한 실험적 연구를 진행하였으며 자기장의 세기와 나노유체의 농도가 증가함에 따라 열전달의 향상과 낮은 Re 수에서 큰 자기장 효과, 그리고 대류열전달이 최대 27.6% 향상됨을 보고하였다. 또한 Ghasemian et al. [54]은 일정한 외부 자기장이 흐르는 소형 채널에 Fe_3O_4 자성 유체의 층류 강제대류열전달에 관하여 해석적 연구를 진행하였으며, 해석 결과, $f=4$ Hz의 외부 자기장을 적용하여 최대 대류열전달은 최대 27.72% 증가하였으며, 자기장으로 인한 열전달 향상은 낮은 레이놀즈수에서 더 큰 영향이 있음을 확인하였다. Nurdin et al. [55]은 다른 연구들과 다른 maghemite ($\gamma-Fe_2O_3$) 나노유체를 적용하여 열적 특성에 관하여 연구를 진행하였으며, 자기장 강도의 증가에 따라 나노유체의 열적 특성이 증가함을 보고하였다.

기존의 연구들을 살펴보면 나노유체를 작동유체로 이용하였을 때 결과적으로 대류열전달 특성이 향상됨을 확인할 수 있었다. 또한 하이브리드 나노유체를 제조할 때 대부분 열전도도가 높은 CNT 계열의 나노입자를 첨가하여 단일 나노유체를 이용하였을 때 보다 열전달 성능을 향상시키는 것을 보고하였다. 이와 더불어 외부

자기장이 적용된 나노유체의 대류열전달 특성 또한 크게 향상됨을 확인할 수 있었다. 하지만 이와 관련하여 많은 연구가 지속적으로 활발히 진행되고 있으나 아직까지 명확한 열전달 성능의 향상 요인이나 현상에 대한 규명은 이루어지고 있지 않은 상태이다.

제 3 절 연구 목적

기존의 연구들을 통하여 작동유체를 나노유체로 적용하여 대류열전달 특성을 향상되는 것을 확인하였다. 대부분 사용되어지는 단일 나노유체 뿐 만 아니라 2 가지 이상의 나노입자를 기본유체에 분산시킨 하이브리드 나노유체를 적용하여 대류열전달 특성이 향상됨을 확인하였다. 또한 나노유체를 작동유체로 적용하는 것에서 더 나아가 외부 자기장을 통해 대류열전달 특성을 향상시키는 연구도 시도되어지고 있다.

이에 따라 외부 자기장의 영향을 받는 자성 나노유체를 작동유체로서 효과적으로 사용하기 위해서는 분산 안정성이 보장되는 자성 나노유체의 농도와 외부 자기장의 세기의 최적화가 중요하다. 이를 위해 다양한 자성 나노유체의 농도와 자기장 세기를 통해 자성 나노유체에 따른 대류열전달 특성에 관한 연구가 필요하다.

하지만 3종류 이상의 자성 나노유체를 적용하여 강제 대류열전달 특성에 미치는 자기장 효과 실험을 통한 자성 나노유체의 특성을 비교 분석한 연구는 제한적이었다. 또한 자성 나노유체는 대부분 Fe_3O_4 자성 나노유체를 작동유체로 사용하여 강제 대류열전달 특성에 미치는 자기장 효과에 대한 연구는 진행되고 있으나, 새로운 자성 나노유체에 관한 연구는 거의 찾아볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 강제 대류열전달 실험의 작동유체로 Water/EG(80:20)기반의 Fe_3O_4 나노유체, Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체, $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 나노유체를 적용하였을 때 강제 대류열전달에 미치는 자기장 효과에 대해 비교 분석하였다. 이때 강제 대류열전달 시스템의 작동유체인 나노유체 농도변화, Reynolds number에 따른 변화 및 자기장의 세기 변화에 따른 실험을 진행하였고, 얻어진 성능을 비교 분석하였다.

또한 Fe_3O_4 나노유체, Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체, $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 나노유체의 강제 대류열전달에 미치는 자기장 효과를 각 나노유체에 따라 분석한 후 각 나노유체 별 최대 성능 비교를 자기장의 세기에 따라 비교 고찰하였다. 다양한

작동조건에 강제 대류열전달 특성에 미치는 자기장 효과를 작동유체 변경에 따라 성능을 실험적으로 비교 고찰하였으며 이를 통하여 최적의 작동조건을 확인하여 열시스템 설계에 필요한 데이터를 제공하고자 한다.

제 2장 실험장치 및 방법

제 1 절 열전도도 측정 장치

관내 강제 대류열전달 실험에 앞서 나노유체의 열적 특성 중 대류열전달 특성에 중요한 변수중 하나인 열전도도를 측정하였다. 열전도도 측정방법은 비정상 열선법(transient hot-wire method) 와 Forced rayleigh method 그리고 Laser/Light flash methd(섬광법) 등이 있다. 본 연구에서는 비정상 열선법(transient hot-wire method)을 이용하여 열전도도를 측정하였다. 비정상 열선법(transient hot-wire method)은 유체의 열전도도를 측정하는데 가장 널리 사용되는 방법으로, 가느다란 열선에 전류를 인가하여 시간에 따라 열선의 온도 상승을 통하여 열전도도를 측정하는 방법이다. 이러한 비정상 열선법은 정상상태법과 비교하여 유체 내에서 발생하는 자연대류 현상을 감소시킬 수 있다. 또한 유체의 열전도도를 정확하게 측정하며, 많은 시간이 소요되지 않는 장점을 가지고 있다.

비정상 열선법에서 금속선의 온도변화가 가장 중요한 요소이다. 하지만 금속선은 미세한 온도변화에도 측정값이 변화되기 때문에 본 연구에서는 이중 중탕 방법을 이용하여 열전도도 측정 장치의 주변 온도를 일정하게 유지하여 자성 나노유체의 열전도도를 측정하였다. Fig. 2.1은 본 연구에서 사용된 열전도도 측정 장치의 실제 사진을 나타냈고, Fig. 2.2는 열전도도의 측정 장치의 개략도를 나타냈다.



Fig. 2.1 Picture of thermal conductivity measurement

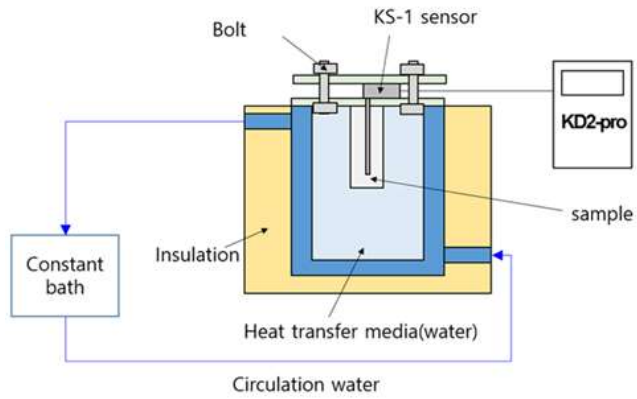


Fig. 2.2 Schematic of thermal conductivity measurement

제 2 절 강제 대류열전달 측정 실험장치

Fig. 2.3은 실험에 사용된 강제 대류열전달 특성을 분석하기 위한 실험장치의 사진을 보여주고 있으며, Table 2.1은 강제 대류열전달 특성 실험이 적용되는 Test section의 재질 및 크기를 나타내었다. 본 연구에서는 작동유체로 Fe_3O_4 나노유체, Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체, $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 나노유체를 적용하였으며, 자기장의 세기는 자기장 장치의 중앙부분을 기준으로 하여 각각 250 Gauss, 500 Gauss, 750 Gauss 으로 변환하여 강제 대류열전달 특성에 미치는 자기장 효과에 관한 실험을 진행하였다.

Fig. 2.4는 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 실험장치의 작동방법은 탱크에 들어있던 자성 나노유체가 펌프를 통하여 Test section 으로 들어가 외부 자기장의 영향을 받은 후 관에서 나오게 된다. 이후 열교환기로 들어가 Test section에서 받은 열을 식힌 후 다시 순환하는 형태를 가진다. Test section의 입구와 출구 온도를 측정하기 위하여 T-type 열전대를 설치하였으며, 마찬가지로 Test section의 국부 온도를 측정하기 위하여 일정한 간격마다 T-type 열전대를 설치하였다. Test section의 일정한 열유속을 줄 수 있도록 power supply, 작동유체의 압력강하를 측정하기 위한 차압계를 설치하였다. 또한 Test section에 일정한 외부 자기장을 줄 수 있도록 국부 대류열전달이 안정적으로 일어나는 Test section의 part 2, 3, 4에 외부 자기장 장치를 설치하였다. 실험을 통하여 얻어진 모든 데이터는 정보수집기(data logger)와 연결하여 수집하였다.

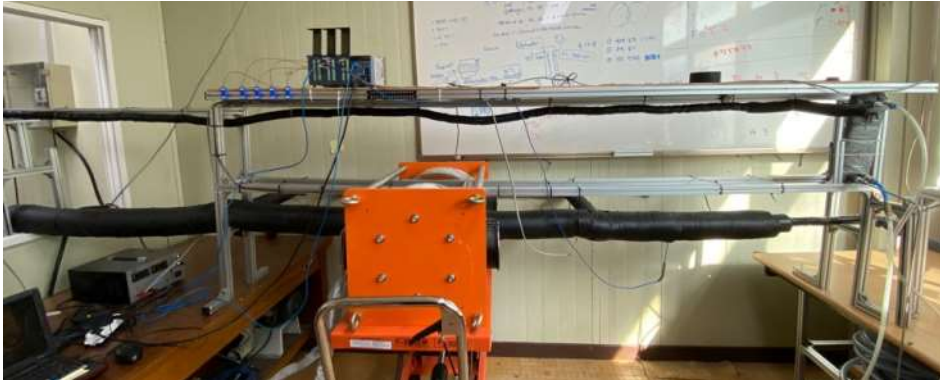


Fig. 2.3 Picture of experimental setup

Table 2.1 Specification of test section

Item	Specification
Material	stainless steel
Length (mm)	1500
Inlet diameter (mm)	3.7
Outlet diameter (mm)	6.3

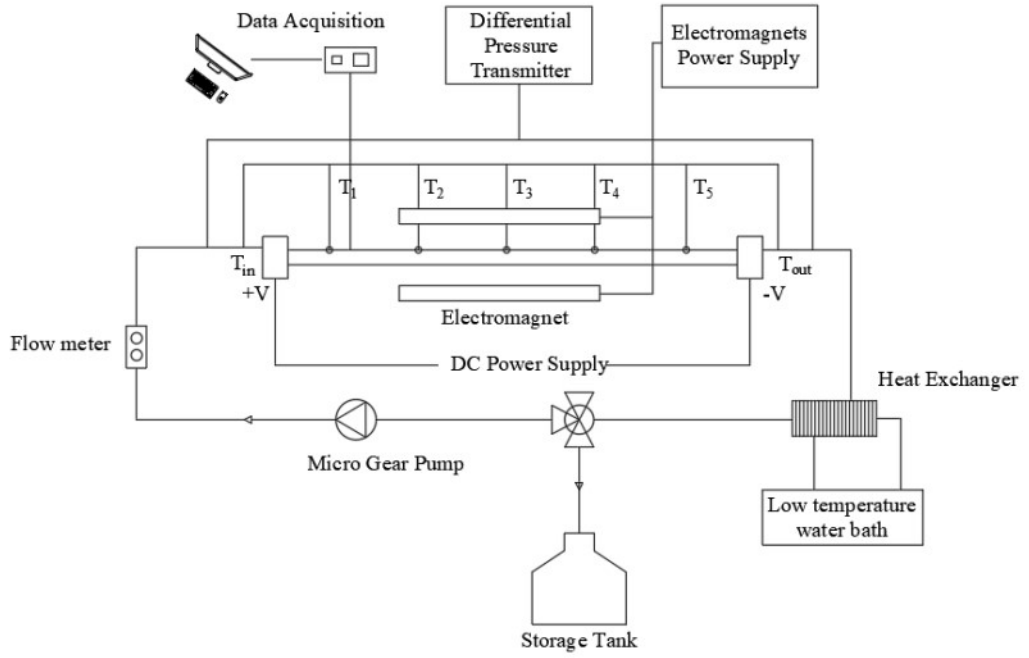


Fig. 2.4 Schematics of experimental setup

1. 온도 측정

Test section의 입구와 출구뿐만 아니라 및 Test section 국부 온도를 측정하기 위하여 T-Type 열전대를 설치하였다. 실험에 사용된 열전대는 오차를 감소시키기 위해 얼음물(0°C)과 끓는물(100°C)에서 온도를 측정하여 뒤 보정하였다. T-Type 열전대의 온도 범위는 -200°C ~ 300°C 이며 정확도는 $\pm 0.75\%$ 이다. Fig. 2.5와 Table 2.2는 T-Type 열전대의 사진과 제원을 나타낸다.



Fig. 2.5 Photograph of T-type thermocouple

Table 2.2 Specification of T-type thermocouple

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

2. 압력강하 측정

Pressure transmitter는 실험의 Test section에서 작동유체의 압력을 측정하기 위해 설치하였다. Test section의 입구와 출구 사이의 압력강하는 Pressure transmitter로 측정하였다. 또한 측정된 작동유체의 압력데이터는 Data logger를 통해 수집된다. Pressure transmitter의 측정범위는 0-5 Psid이며, 정확도는 $\pm 0.25\%$ 이다. Fig. 2.6과 Table 2.3은 Pressure transmitter의 사진과 제원을 나타낸다.



Fig. 2.6 Photograph of pressure transmitter

Table 2.3 Specifications of pressure transmitter

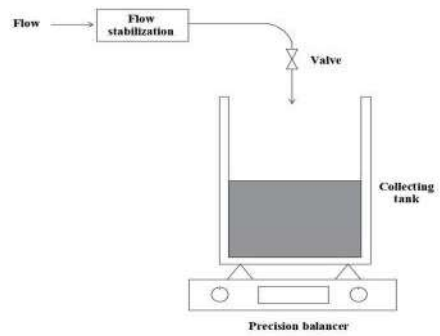
Items	Specifications
Model	2301005PD2F11BC
Range (PSID)	0-5
Output (mA)	4-20
Accuracy(%)	0.25

3. 유량 측정

작동유체의 질량유량을 계산하기 위하여 필요한 전자식 저울(FX-300i)을 적용하여 작동유체의 질량을 측정하였다. 작동유체 측정 장치는 밸브, 비커, 전자식 저울을 구성된다. 특정 시간 동안 흐르는 작동유체의 양을 측정하여 Test section에 흐르고 유체의 질량유량을 계산하였다.



(a) Precision Balance (FX-300i)



(b) The liquid flow-weighing measurement

Fig. 2.7 Photograph of the mass flow rate measurement of (a) Precision Balance (FX-300i) (b) The liquid flow-weighing measurement

Table 2.4 Specifications of precision balance

Items	Specifications
Model	FX-300i
Maximum capacity (g)	320

4. 열교환기

본 연구에서 사용된 열교환기(B3-030-10-3.0-HQ)는 Test section의 열용량을 고려하여 설치하였다. 작동유체의 열부하를 열교환기를 통해 냉각수와 교환하여 다시 Test section으로 들어가 순환하게 된다. 본 연구에서 사용된 판형 열교환기의 온도범위는 $-196\sim 200^{\circ}\text{C}$ 이며, 압력범위는 $-1\sim 30$ Bar 이다. Fig. 2.8과 Table 2.5는 열교환기의 사진과 상세제원을 보여준다.



Fig. 2.8 Photograph of brazed plate heat exchanger

Table 2.5 Specifications of brazed plate heat exchanger

Items	Specifications
Model	B3-030-10-3.0-HQ
Temperature range ($^{\circ}\text{C}$)	$-196/+200$
Pressure range (bar)	$-1/30$

5. Micro gear pump

소형 기어 펌프는 탱크에 들어있던 작도유체를 Test section으로 흘려보내기 위하여 사용하였다. 실험에 사용된 펌프의 rpm 범위는 300-300 rpm 이며, 정확도는 1%이다. Fig 2.9와 Table 2.6은 펌프의 사진과 제원을 보여준다.



Fig. 2.9 Photograph of Micro gear pump

Table 2.6 Specifications of micro gear pump

Items	Specifications
Model	WT3000-1FA
Flow rate (ml/min)	85.7 to 2571.4
Speed (rpm)	300-3000
Accuracy (%)	±1.0
Diameter of particle in liquid (μm)	10
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	-45 to 120

6. Power supply

Power supply는 강제 대류열전달 실험장치의 Test section에 일정한 열을 주기 위해 사용된 장치이다. Power supply를 직접 Test section 양 끝의 열선에 연결시켜 흐르는 작동유체의 일정한 열유속을 가하도록 설계하였다. Fig 2.10과 Table 2.7은 power supply의 사진과 제원을 보여준다.



Fig. 2.10 Photograph of DC power supply

Table 2.7 Specifications of DC power supply

Items	Specifications
Model	DSP-2005
Normal capacity (kW)	1
Maximum voltage (V)	200
Maximum current (A)	5

7. 자기장 장치

강제 대류열전달 실험 장치에 외부 자기장을 주기 위하여 자기장 장치를 사용하였다. 자기장 장치의 최대 전압은 60 V이며, 정확도는 5%이다. Fig. 2.11과 Table 2.8은 자기장 장치의 사진과 제원을 보여준다.



Fig. 2.11 Photograph of electro magnetic field generator

Table 2.8 Specifications of electro magnetic field generator

Items	Specifications
Size(H)	450,450,250
Maximum voltage (V)	60
Accuracy (%)	±5

8. 데이터 수집장치

강제 대류열전달 실험장치의 성능을 측정하기 위하여 설치된 T-type 열전대, 차압계의 데이터 성능은 데이터 수집장치(Data logger)를 사용하여 수집하였다. 데이터 수집장치에서 수집한 데이터는 PC로 전송되며, 데이터 수집장치의 프로그램을 통해 모니터할 수 있다. Fig. 2.12와 Table 2.9는 데이터 수집장치의 사진과 제원을 보여준다.



Fig. 2.12 Photograph of data acquisition system

Table 2.9 Specification of data acquisition system

Items	Specifications
Model	MX100
Number of inputs	10
Measurement interval (ms)	100
Operating temperature range (°C)	0 to 50
Rated power supply voltage (VDC)	12 to 28

제 3 절 나노유체 제작

1. 나노유체 제조 방법

나노유체는 단순한 고체-액체 혼합물이 아닌 물, 오일, 에틸렌글리콜, 냉매와 같은 기존의 작동유체에 열적 특성을 가지는 나노크기의 입자를 분산시킨 복합적 콜로이드이다. 단순한 고체-액체 혼합물의 경우, 나노유체의 나노입자가 액체바닥에 침전되는 경향이 있다. 따라서 이러한 나노입자의 침전은 열 시스템 성능에 부정적 영향을 미칠 뿐만 아니라 펌프를 막거나 열전달 표면을 오염시킨다. 그러므로 분산성이 좋은 나노유체를 제조하는 것은 나노유체의 응용분야에서 주요 관심사 중 하나이다.

본 연구에서 사용된 나노유체는 2l 정도가 필요하기 때문에 분산 안정성을 확보하기 위하여 Two-step 방법으로 나노유체를 제작하였다. Two-step 방법을 통해 생산된 나노입자를 유체 내에 첨가한 뒤 2시간 동안 교반한 후 초음파 분산기를 사용하여 2시간 분산시켰다.

또한 나노유체의 대류열전달 특성에 미치는 자기장 효과를 확인하기 위해서는 자성 나노유체의 분산안정성이 확보되어야 한다. 본 연구에서는 시각적 확인과 제타포텐셜(Zeta potential) 장치를 사용하여 확인하였다. 제타 포텐셜 장치를 사용하여 나노유체를 측정할 때 절대 측정값이 30 이상이면 안정된 나노유체로 판단된다. 우선 나노유체의 시각적 검사를 위하여 Fe_3O_4 와 $Fe_3O_4/MWCNT$ 및 $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 자성 나노유체는 한 달 동안 관찰하였으며, 모든 자성 나노유체는 침전되지 않았음을 확인하였다. 또한 제타 포텐셜 장치를 사용하여 측정한 결과 Fe_3O_4 와 MWCNT 및 $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 자성 나노유체의 제타 포텐셜은 -34~-56 mV로 나타나 분산안정성을 확인하였다. 본 연구에서는 시각적 확인과 제타 포텐셜 측정을 통하여 제조된 자성 나노유체의 분산안정성을 확인하였다.

2. Fe₃O₄ 나노유체

Fe₃O₄ 나노유체의 제조 과정은 Fe₃O₄ 나노입자 합성과 베이스유체에 나노입자를 분산하는 two-step 제조 방법으로 제조된다. Fe₃O₄ 나노입자의 제조방법은 화학적 공침법(chemical co-precipitation method)을 통해 제조하였다. 먼저 염화철(FeCl₂)과 염화철(FeCl₃)의 혼합물을 50°C의 온도에서 자기 교반하였다. 교반 과정에서 암모니아 용액(NH₄OH)을 적가 하여 50°C의 온도를 증가시켰다. 증가된 온도 환경에서 암모니아 용액(NH₄OH)을 첨가하면 용액 색상이 갈색에서 검은색으로 변화된다. 이후 영구 자석을 이용하여 암모니아 용액에서 흑색 나노입자를 분리하고 증류수로 3회 이상 세척하였다. 분리된 Fe₃O₄ 나노입자를 진공 펌프로 90°C의 온도에서 1시간 동안 펌핑하여 폴리아크릴산(acrylic acid)으로 코팅하였다. 코팅 공정 후 Fe₃O₄와 폴리아크릴산(acrylic acid)의 혼합물을 주위 온도에 도달 할 때까지 냉각하고 진공필터에서 건조시켰다. Fig 2.13은 Fe₃O₄ 나노입자의 합성 및 코팅 과정을 보여준다.

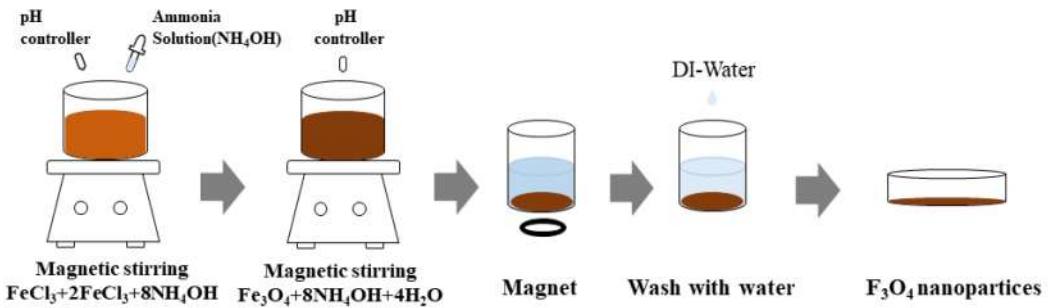


Fig. 2.13 Co-precipitation manufacturing method of Fe₃O₄ nanoparticles

Fig. 2.14는 제조한 나노입자를 확인하기 위해 TEM image이며, Fig. 2.15는 실험에 사용된 농도변화에 따른 Fe₃O₄ 나노유체 사진이다. Fe₃O₄ 나노유체의 농도는 각각 0.025wt%, 0.05wt%, 0.1wt%, 0.2wt%로 제조하여 실험을 진행하였다.

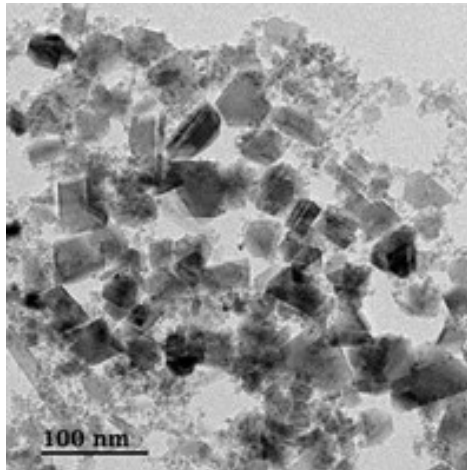


Fig. 2.14 TEM image of Fe₃O₄ nanoparticles



Fig. 2.15 Pictures of Fe₃O₄ nanofluids

3. Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체

본 연구에서 Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체는 베이스유체(Water:EG=80:20)에 Fe₃O₄와 MWCNT 나노입자를 1 대 1 비율로 첨가하여 제작하였다. Fe₃O₄ 나노입자는 화학적 공침법(chemical co-precipitation method)을 통해 제조하였으며, MWCNT 나노입자는 AVENTION에서 구입하여 사용하였다. MWCNT 나노입자를 선택하여 실험을 실시한 이유는 기존의 다양한 나노유체들 중 나노입자는 넓은 표면적과 높은 열전도도를 가지고 있어 열장치의 작동물질로 적합하기 때문이다. 이와 더불어 우수한 광학 특성을 가지고 있고 쉽게 제작이 가능하기 때문에 다른 나노입자에 비하여 열전도도가 낮은 Fe₃O₄ 나노유체의 열물성을 보완하고 시너지 효과를 줄 수 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 MWCNT 나노입자를 첨가하여 Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체를 제조하여 사용하였다.

Fig. 2.16은 제조한 나노입자를 확인하기 위한 TEM (Transmission electron microscopy) image이며, Fig. 2.17은 실험에 사용된 농도변화에 따른 Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체 사진이다. Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 농도는 0.025wt%, 0.05wt%, 0.1wt%, 0.2wt%로 제조하여 실험을 진행하였다.

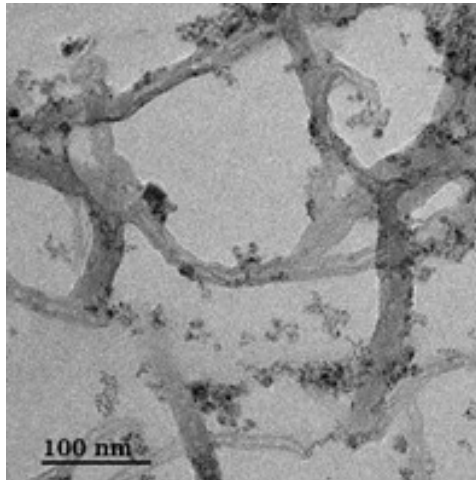


Fig. 2.16 TEM image of Fe₃O₄/MWCNT hybrid nanoparticles

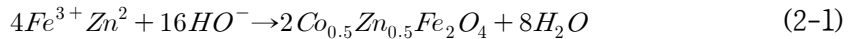


Fig. 2.17 Pictures of Fe₃O₄/MWCNT hybrid nanofluids

4. $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체

$\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체를 제조하는 과정은 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노입자 합성과 기본 유체에 나노입자를 분산하는 two-step 제조 방법으로 제조된다. $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노입자는 염화코발트 (CoCl_2), 황산 아연 (ZnSO_4) 및 염화철 (III) (FeCl_3)을 사용하여 화학적 공침법(chemical co-precipitation method)을 통해 제조된다. 본 연구에서는 Oleic acid를 코팅제로 사용하였다.

$\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 의 화학 방정식은 Eq(2-1)과 같다.



화학적 공침법(chemical co-precipitation method)을 통해 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노입자를 제조하기 위해 먼저 각각 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 8.10gr, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1.78gr, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2.15gr을 DI-water 225 ml에 녹여 온도가 80°C가 될 때까지 가열하였다. 다음으로 NaOH 4 mol/l 56 ml와 DI-water 18.75 ml의 혼합물을 80°C에서 자기 교반(magnetic stirring)하는 첫번째 용액에 떨어뜨려 첨가하였다. 침전된 나노입자들은 80°C에서 1시간동안 가열한 후에 실온으로 냉각시켰다. 냉각 후 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노입자 침전물을 자석을 이용하여 반응물로부터 분리하고 DI-water로 3회 이상 세척하였다.

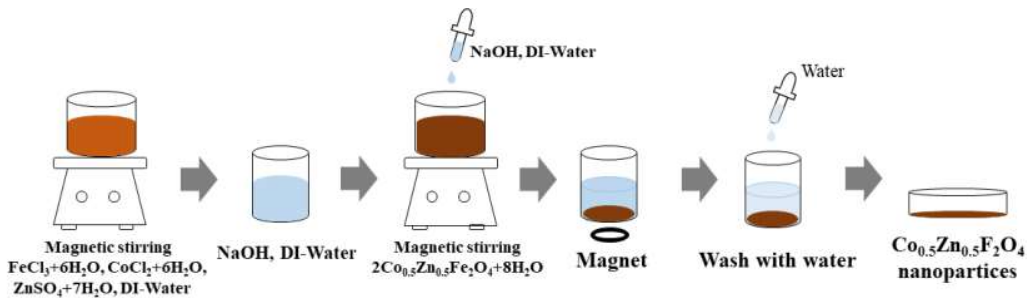


Fig. 2.18 Co-precipitation manufacturing method of $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles

베이스 유체(Water:EG=80:20)에 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노입자를 분산시키기 위해 20 kHz의 초음파로 2시간 동안 나노유체를 분산시켰다. 실험에 사용된 나노유체의 농

도는 각각 0.025wt%, 0.05wt%, 0.1wt%, 0.2wt%이다. 이후 NaOH를 이용하여 제조한 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체는 pH 10-11로 유지하였다.

제작된 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노입자를 확인하기 위하여 TEM를 촬영하였으며, Fig. 2.19에 나타냈다. Fig. 2.20은 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체를 농도변화에 따른 사진이다.

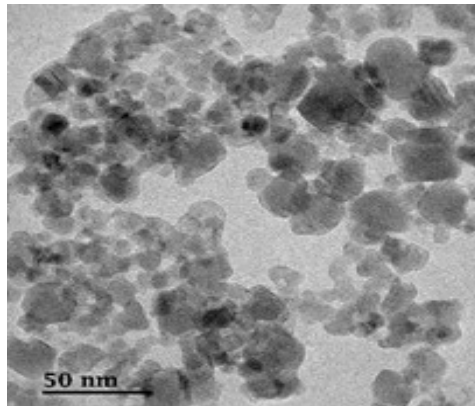


Fig. 2.19 TEM image of $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles

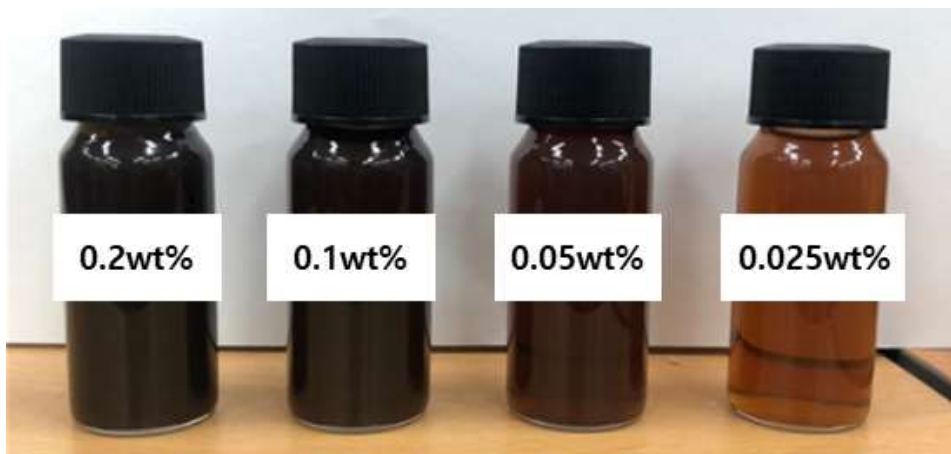


Fig. 2.20 Pictures of $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluids

제 4 절 실험방법 및 대류열전달계수 계산

1. 실험방법 및 조건

본 연구에서는 Water:EG=80:20 기반의 다양한 자성 나노유체를 적용하여 대류 열전달 특성에 미치는 자기장 효과에 관한 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 작동 유체는 각각 Water:EG=80:20, Fe_3O_4 나노유체, Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체, $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 나노유체가 사용되었으며, 자기장 세기에 따른 대류열전달계수를 측정하였다. 이때 각 자성 나노유체에서의 최대 열전달 특성을 나타내는 자기장 세기에 따른 자기장 효과를 비교분석하였다. Table 2.10은 본 연구에서 사용된 실험조건을 나타내고 있다.

Table 2.10 Operating conditions of experiment

Item	Specification
Working fluid	Water/EG=80:20, Fe_3O_4 , Fe_3O_4 /MWCNT, and $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ nanofluid
Reynolds numbers	1000, 1200, 1400, 1600
Magnetic field (Gauss)	0, 250, 500, 750
Inlet temperature (°C)	25
Power supply (W)	100
Mass flow rate (kg/s)	0.005-0.009
Velocity (m/s)	0.381-0.715

2. 대류열전달계수 및 불확실도 계산

자성 나노유체의 대류열전달 특성에 미치는 자기장 효과의 확인과 기본 유체인 Water/EG(80:20)과 자성 나노유체를 적용하여 열전달 성능을 비교 분석하기 위하여 실험을 진행하였다. 본 연구에서 사용된 Fe_3O_4 와 $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 나노유체의 밀도와 비열은 식(2-2)와 식(2-3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

$$c_p = \frac{(1 - \phi)\rho_{bf}c_{p,bf} + \phi\rho_n c_{p,n}}{(1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_n} \quad (2-3)$$

이때 ρ_{bf} 는 베이스유체의 밀도, ρ_{np} 는 나노입자의 밀도, ϕ 는 나노유체의 농도를 나타낸다.

그리고 Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체의 비열 및 밀도는 식(2-4)와 식(2-5)와 같이 계산할 수 있다.

$$\rho_{np1+np2} = \frac{\rho_{np1} \times \phi_{np1} + \rho_{np2} \times \phi_{np2}}{\phi_{np1} + \phi_{np2}} \quad (2-4)$$

$$c_{p,nf1+nf2} = \frac{\phi_1\rho_{np1}c_{p,np1} + \phi_2\rho_{np2}c_{p,np2}}{\rho_{np}(\phi_1 + \phi_2)} \quad (2-5)$$

열 및 물리적 특성은 부피 분율에 따른 대류열전달 실험 및 Nusselt Number 분석에 사용된다. 이를 위해 작동유체에 의해 흡수된 열은 식(2-6)을 통해 계산된다.

$$Q = mc_p(T_o - T_i) \quad (2-6)$$

여기서 m 은 작동유체의 질량유량이며, c_p 는 작동유체의 비열, T_i 와 T_o 는 Test section의 입구와 출구의 온도를 나타낸다.

Test section의 축 거리에 따른 대류열전달계수는 식(2-7)를 사용하여 계산 할 수 있다.

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_b)} \quad (2-7)$$

여기서 A 는 Test section의 면적, T_w 와 T_b 는 표면의 평균 온도와 국부 bulk temperature 이다.

식(2-7)을 통해 계산한 대류열전달계수와 측정된 나노유체의 열전도도를 적용하여 나노유체의 Nusselt number는 다음 식(2-8)를 이용하여 계산하였다.

$$N = \frac{hD}{k} \quad (2-8)$$

여기서 D 는 Test section의 내부 직경이며, k 는 나노유체의 열전도도이다. 본 연구에서는 나노유체의 대류열전달계수 특성 실험하기에 앞서 증류수를 작동유체로 적용하여 얻어진 결과를 통하여 제작된 실험장치의 신뢰성을 검증하였다. 이를 위하여 증류 영역에서 가장 널리 알려진 Shah equation과 비교를 통해 검증하였으며 Shah가 제시한 식은 식(2-9)와 같이 나타낸다[36].

$$Nu = \begin{cases} 1.953 \left(Re Pr \frac{D}{x} \right)^{1/3} & Re Pr \frac{D}{x} \geq 33.3 \\ 4.364 + 0.0722 Re Pr \frac{D}{x} & Re Pr \frac{D}{x} < 33.3 \end{cases} \quad (2-9)$$

증류수에 대한 Shah equation의 이론적 상관관계와 본 연구에서 측정된 Nusselt number의 비교하였다. 증류수에 대한 Reynolds 수가 증가함에 따라 Nusselt 수가 증가함이 나타났다. 증류 영역에서 Shah equation과 실험결과의 평균 오차 3.25 %이며, 최대 오차 4.75%로 나타났다. 이러한 결과를 통하여 제작된 실험장치를 통하여 얻어진 실험결과의 신뢰성이 확보되었다고 판단된다.

실험의 불확실도는 Beckwith et al. [56]에 의해 제시된 식이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다. 먼저, Reynolds number의 최대오차는 식(2-10)과 같이 계산하였다.

$$\frac{U_{Re}}{Re} = \sqrt{\left(\frac{U_m}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{U_\mu}{\mu}\right)^2} \leq 0.1\% \quad (2-10)$$

또한 대류열전달계수의 최대오차는 식(2-11)과 같이 계산하였다.

$$\frac{U_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{U_q}{q}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_w - T_b}}{T_w - T_b}\right)^2} \leq 0.23\% \quad (2-11)$$

그리고 열유속의 최대오차는 식(2-12)와 같이 계산하였다.

$$\frac{U_q}{q} = \sqrt{\left(\frac{2U_\nu}{V}\right)^2 + \left(\frac{U_R}{R}\right)^2} \leq 0.21\% \quad (2-12)$$

제 3장 실험 결과 및 고찰

제 1 절 자성 나노유체의 열전도도 측정결과

본 연구에 관내 강제 대류열전달 실험에 앞서 대류열전달 특성에 중요한 변수인 열전도도를 측정하였다. 열전도도를 측정한 자성 나노유체는 각각 Fe_3O_4 나노유체, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체, $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체이다. 열전도도를 측정하는 자성 나노유체의 농도는 각각 0.025wt%, 0.05wt%, 0.1wt%, 0.2wt% 이고, 자성 나노유체의 열전도도는 입구온도와 동일한 25°C의 온도에서 측정하였다.

본 연구에서 사용한 자성 나노유체의 열전도도 측정 결과는 Fig. 3.1에 나타내었다. 자성 나노유체의 농도가 증가할수록 자성 나노유체의 열전도도가 증가함을 확인할 수 있었다. 자성 나노유체의 종류에 따른 열전도도를 살펴보면, Fe_3O_4 나노유체의 열전도도는 0.025wt%, 0.05wt%, 0.1wt%, 0.2wt%에 따라 각각 0.515, 0.518, 0.520, 0.521 W/mK로 나타났다. 또한 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 열전도도는 각각 0.516, 0.519, 0.524, 0.531 W/mK가 나타났으며, $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 열전도도는 각각 0.521, 0.524, 0.528, 0.530 W/mK으로 나타났다.

작동유체별 최대 열전도도는 대부분 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체에서 나타났으나 0.2wt%의 농도에서는 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체에서 최대 열전도도가 나타났다. 뿐 만 아니라 농도가 낮은 경우에는 Fe_3O_4 나노유체와 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 열전도도 차이는 많이 나지 않았으나 0.1wt% 농도부터는 급격한 열전도도 차이가 나타났다. 이를 통해 MWCNT 나노입자를 첨가하여 열적 특성이 향상되었음을 확인하였다. 대부분의 농도에서 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체가 대류열전달 특성을 향상시킴을 예상 할 수 있으며, 좋게 나타남을 예상하고 동일한 0.2wt% 농도에서는 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체에서 최대 대류열전달 특성이 나타날 것으로 예상 할 수 있다.

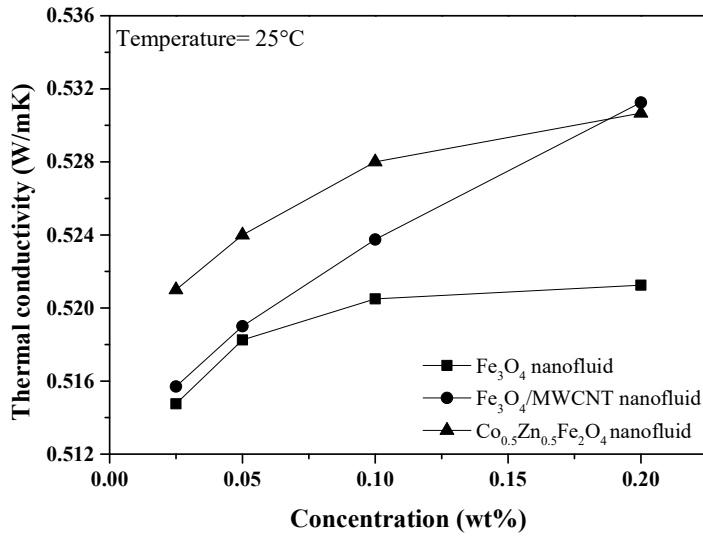


Fig. 3.1 Variation of thermal conductivity at the temperature of 25°C under different weight concentrations of nanofluids

제 2 절 자기장 세기에 따른 Fe_3O_4 나노유체의 강제 대류열 전달 실험 결과

1. Fe_3O_4 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달계수의 변화

본 연구에서는 Fe_3O_4 나노유체를 적용한 대류열전달 특성에 미치는 자기장 효과에 관하여 실험을 진행하였으며, 자기장의 세기는 각각 250, 500, 750 Gauss를 적용하여 실험을 진행하였다. 또한 Fe_3O_4 나노유체의 농도는 각각 0.025wt%, 0.05wt%, 0.1wt%, 0.2wt%를 사용하였다. Fig. 3.2는 Fe_3O_4 나노유체 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달계수의 변화를 농도에 따라 보여주고 있다. 실험결과 Fe_3O_4 나노유체는 자기장 세기가 증가함에 따라 대류열전달계수가 증가함을 보였으며, Re 수가 증가함에 따라 대류열전달계수가 증가하였다. Re 수가 증가할수록 나노유체의 유속이 증가되면서 나노유체의 브라운 운동이 활발해져 대류열전달이 활발하게 이루어지고 이는 빠른 대류열전달계수의 증가로 이루어진다.

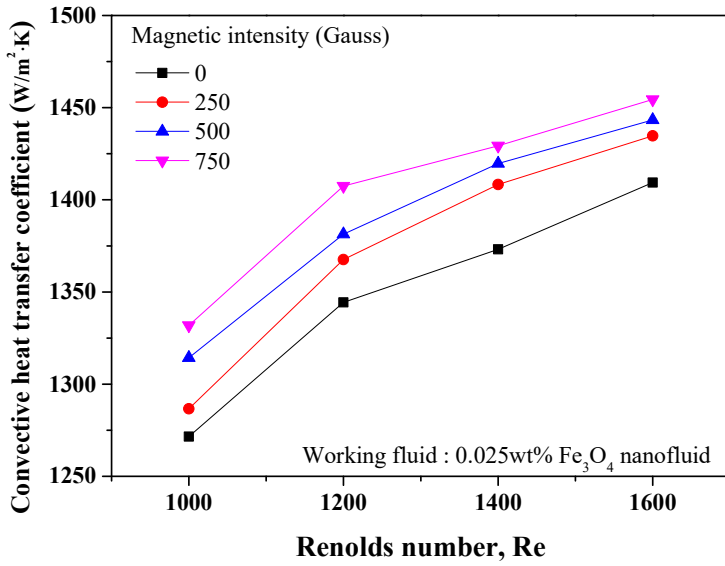
먼저 Fig. 3.2(a)를 보면, 0.025wt% Fe_3O_4 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달계수의 변화를 나타내고 있다. Re 수가 증가함에 따라 대류열전달계수가 증가하는 것으로 보았을 때 최대 대류열전달계수가 나타난 Re 수 1600에서 대류열전달계수를 비교하면, 0.025wt% Fe_3O_4 나노유체를 자기장 세기 0 Gauss로 적용하였을 때 대류열전달계수는 $1409 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 나타났으며, 자기장의 세기를 각각 250, 500, 750 Gauss로 주었을 때 대류열전달계수는 각각 1434, 1443, $1454 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 나타났다. 0.025wt% Fe_3O_4 나노유체의 대류열전달계수는 자기장의 세기가 없는 0 Gauss 대비 자기장의 세기가 250, 500, 750 Gauss 일 때 각각 1.80%, 2.41%, 3.20% 향상됨을 확인하였다.

Fig. 3.2(b)와 (c)에서는 0.05wt%와 0.1wt% Fe_3O_4 나노유체의 자기장 세기에 따른 대류열전달계수의 변화를 보여주고 있다. 자기장의 세기가 0 Gauss 일 때 Re 수 1600에서 0.05wt%와 0.1wt% Fe_3O_4 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1436,

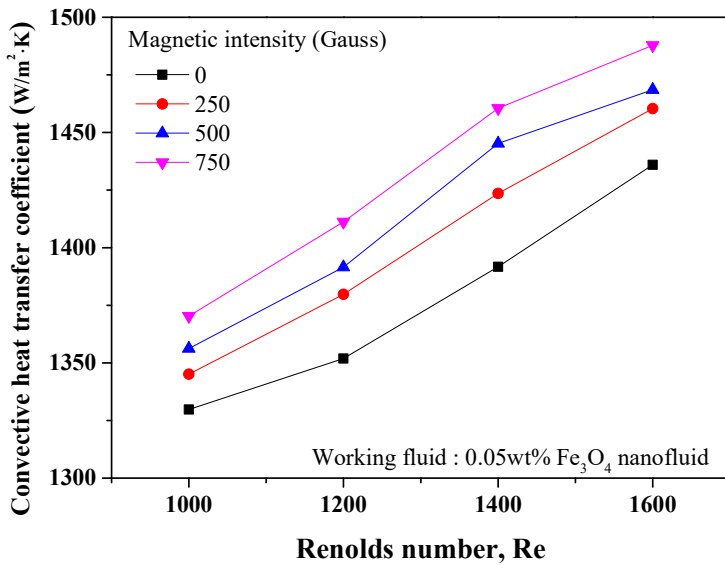
1562 W/m²K이며, 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.05wt% Fe₃O₄ 나노유체의 평균 대류열전달계수는 각각 1460, 1469, 1488 W/m²K이고, 0.1wt% Fe₃O₄ 나노유체의 평균 대류열전달계수는 각각 1572, 1589, 1602 W/m²K 이다.

Fig. 3.2(d)에서 0.2wt% Fe₃O₄ 나노유체의 자기장 세기에 따른 대류열전달계수의 변화를 보여주고 있다. 자기장 세기가 0 Gauss 일 때 Re 수가 1600일 때 0.2wt% Fe₃O₄ 나노유체의 평균 대류열전달계수는 1617 W/m²K이며, 자기장의 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 평균 대류열전달계수는 각각 1643, 1661, 1676 W/m²K로 나타났다. 0.2wt% Fe₃O₄ 나노유체의 대류열전달계수는 자기장 세기가 0 Gauss 대비 각각 1.63%, 2.74%, 3.66% 향상됨을 확인하였다. Fe₃O₄ 단일 나노유체의 최대 대류열전달계수는 0.2wt% Fe₃O₄ 나노유체에서 나타났다.

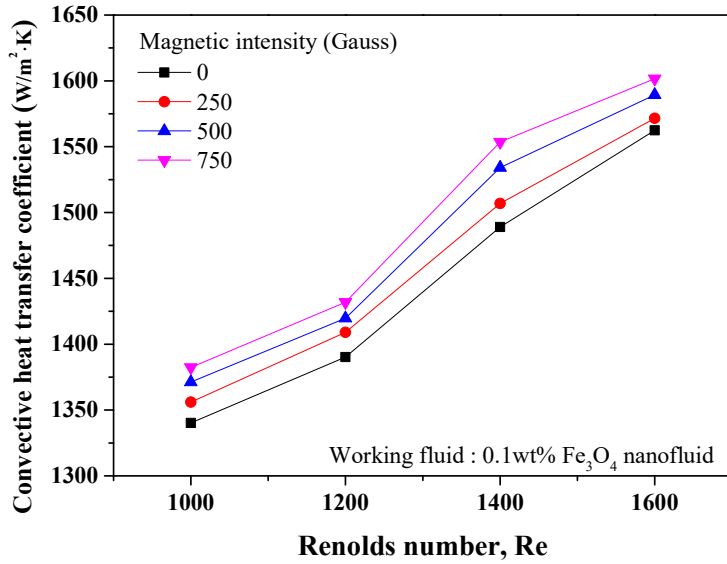
자성 나노유체를 적용하였을 때 자기장의 세기가 없는 상태에서 브라운 운동과 열이동(thermophoresis)에 의해 열경계층이 얇아지게 되어 대류 열전달을 향상시켰다. 뿐만 아니라 자기장 세기가 증가할수록 대류열전달계수가 증가하는 경향을 확인하였으며, 이는 Fe₃O₄ 자성 나노입자가 자기장으로 인해 관 내 벽에 나노입자가 응집되어 체인 형태를 형성하고 관 벽과 유체 사이의 미세 난류가 형성되어 대류 열전달을 향상시키기 때문이다.



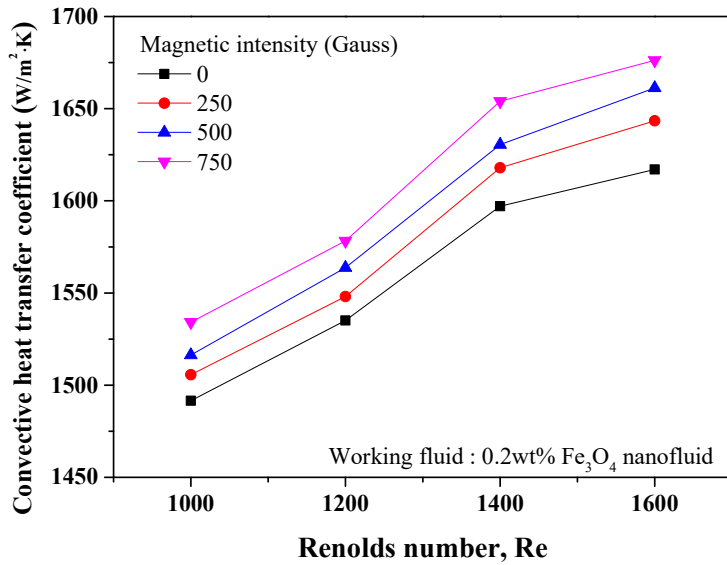
(a) 0.025wt% Fe₃O₄ nanofluid



(b) 0.05wt% Fe₃O₄ nanofluid



(c) 0.1wt% Fe₃O₄ nanofluid



(d) 0.2wt% Fe₃O₄ nanofluid

Fig. 3.2 Convective heat transfer coefficient of Fe₃O₄ nanofluid under an external magnetic field

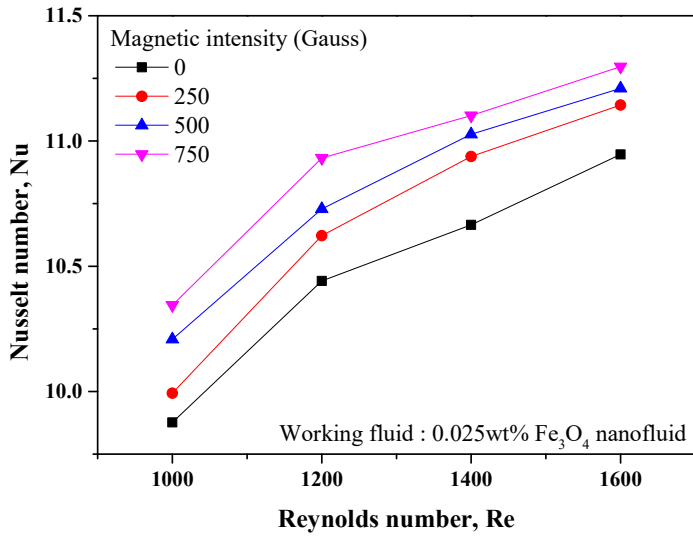
2. Fe₃O₄ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nusselt number의 변화

Fig. 3.3은 Fe₃O₄ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nu 수의 변화를 보여주고 있다. Fig. 3.1에서 자기장 변화에 따른 Fe₃O₄ 나노유체의 대류열전달계수를 확인했듯이 자기장의 세기가 증가할수록 Nu 수가 증가하는 경향을 보였다. 우선, Fig. 3.3(a)은 0.025wt% Fe₃O₄ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nu 수를 나타내고 있으며, Re 수 1600에서 0.025wt% Fe₃O₄ 나노유체의 자기장 세기가 0 Gauss 일 때 Nu 수는 10.9이고, 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss로 증가하였을 때 0.025wt% Fe₃O₄ 나노유체의 Nu 수는 각각 11.1, 11.2, 11.3으로 나타났다. 자기장의 세기가 0 Gauss 일 때 대비 0.025wt% Fe₃O₄ 나노유체의 Nu 수는 각각 1.80%, 2.41%, 3.20% 증가됨을 확인하였다.

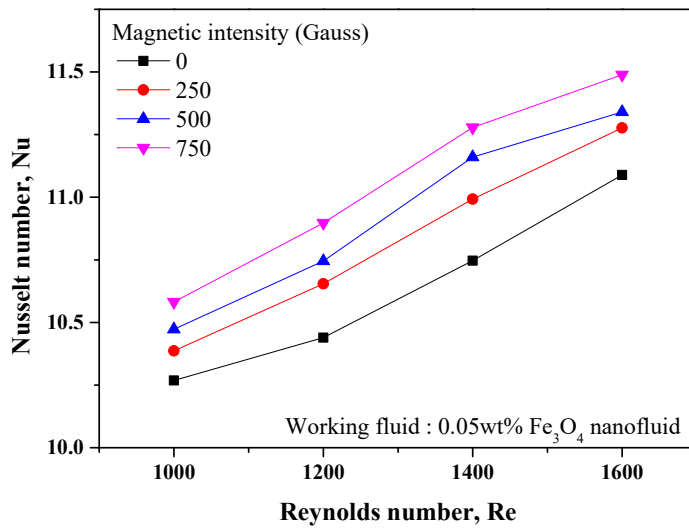
Fig. 3.3(b)과 (c)는 0.05wt%와 0.1wt% Fe₃O₄ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nu 수를 보여주고 있다. Fig. 3.3(a)와 동일하게 Re 수가 1600에서 0.05wt% Fe₃O₄ 나노유체의 Nu 수는 자기장의 세기가 각각 0, 250, 500, 750 Gauss 일 때 각각 11.1, 11.3, 11.4, 11.5로 나타났으며, 자기장 세기 0 Gauss 대비 0.05wt% Fe₃O₄ 나노유체의 Nu 수는 자기장 세기가 증가함에 따라 각각 1.70%, 2.27%, 3.61% 향상됨을 확인하였다. 그리고 0.1wt% Fe₃O₄ 나노유체의 Nu 수는 자기장의 세기가 각각 0, 250, 500, 750 Gauss 일 때 Nu 수는 각각 12.0, 12.1, 12.2, 12.3이고, 자기장 세기 변화에 따라 0.1wt% Fe₃O₄ 나노유체의 Nu 수는 0 Gauss 대비 각각 0.59%, 1.73%, 2.51% 향상됨을 확인할 수 있다.

Fig. 3.3(d)은 0.2wt% Fe₃O₄ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nu 수를 나타냈다. Fe₃O₄ 나노유체의 농도 중 최대 대류열전달계수가 확인되었으며, 0.2wt% Fe₃O₄ 나노유체는 Nu 수 또한 가장 크게 나타났다. 1600의 Re 수에서 자기장 세기가 없는 0 Gauss에서 0.2wt% Fe₃O₄ 나노유체의 Nu 수는 12.4이며 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 Nu 수는 각각 12.6, 12.8, 12.9이다. 이는 자기장 세기가 없는 상태인 0 Gauss 대비 각각 1.63%, 2.74%, 3.66% 향상됨을 확인할 수 있다.

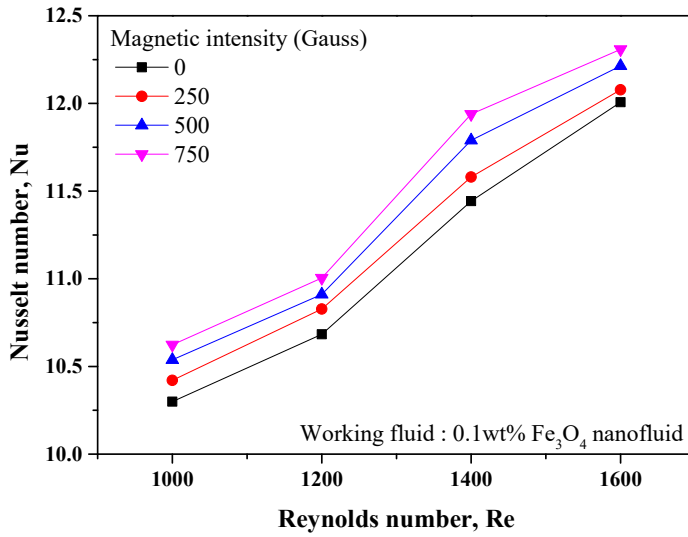
본 연구에서 Fe_3O_4 나노유체의 Nu 수는 전체적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 실험에서 연구된 나노유체의 Nu 수는 식 (2-8)과 같이 계산되며, 주어진 조건에서 Fe_3O_4 나노유체의 농도변화에 따른 일정한 열전도도를 사용한다. 이에 따라 외부 자기장을 통해 Fe_3O_4 나노입자의 응집형태가 체인 모양으로 형성되어 미세 와류가 발생하고 이를 통해 열전달이 활발하게 진행되면서 대류열전달계수가 증가함에 따라 Nu 수가 증가하는 경향이 나타난다.



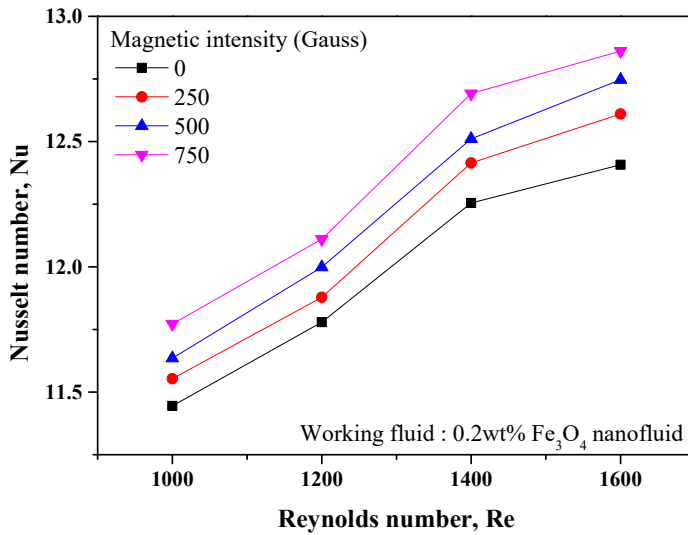
(a) 0.025wt% Fe₃O₄ nanofluid



(b) 0.05wt% Fe₃O₄ nanofluid



(c) 0.1wt% Fe₃O₄ nanofluid



(d) 0.2wt% Fe₃O₄ nanofluid

Fig. 3.3 Nusselt number of Fe₃O₄ nanofluid under an external magnetic field

3. Fe₃O₄ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 압력강하의 변화

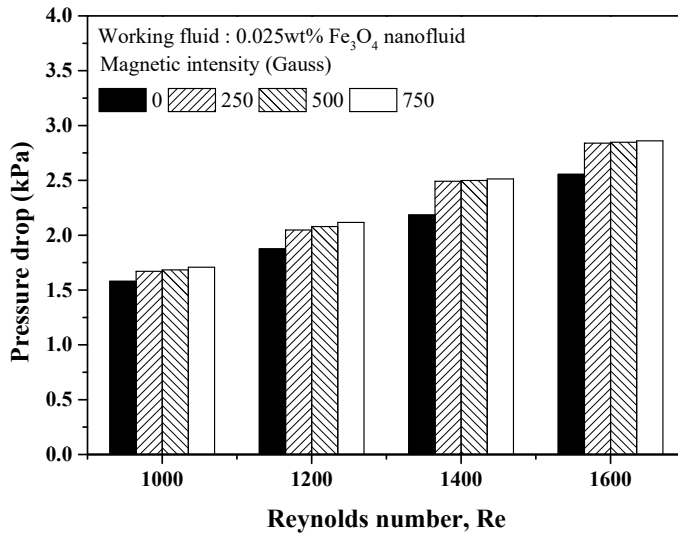
Fig. 3.4는 Fe₃O₄ 나노유체의 자기장 변화에 따른 압력강하를 보여주고 있다. Reynolds number가 증가함에 따라 압력강하가 증가하는 경향이 보이며, 자기장의 세기가 증가될수록 압력강하가 증가함을 보였다. Fig. 3.4(a)는 0.025wt% Fe₃O₄ 나노유체의 자기장 변화에 따른 압력강하를 보여주고 있다. 압력강하가 가장 높게 나타난 Re 수 1600에서 자기장이 없는 0 Gauss에서 0.025wt% Fe₃O₄ 나노유체의 압력강하는 2.55 kPa이며, 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 압력강하는 각각 2.84, 2.85, 2.86 kPa로 증가하는 것으로 나타났다. 자기장이 없는 0 Gauss 대비 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.025wt% Fe₃O₄ 나노유체의 압력강하는 각각 11.2%, 11.5%, 12.0% 향상됨을 확인하였다.

Fig. 3.4(b)와 (c)는 0.05wt%와 0.1wt% Fe₃O₄ 나노유체의 자기장 변화에 따른 압력강하를 나타내며, 0.05wt%와 0.1wt% 나노유체의 Fe₃O₄ 나노유체의 자기장 없는 상태인 0 Gauss에서의 압력강하는 각각 2.70와 2.79 kPa이다. 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.05wt% Fe₃O₄ 나노유체의 압력강하는 각각 2.93, 2.94, 2.95 kPa이며, 0.1wt% Fe₃O₄ 나노유체의 압력강하는 각각 2.95, 2.96, 2.97 kPa이다. 자기장의 영향으로 인해 0.05wt% Fe₃O₄ 나노유체의 압력강하는 각각 8.73%, 8.85%, 9.08% 증가되고, 0.1wt% Fe₃O₄ 나노유체의 압력강하는 각각 5.52%, 5.64%, 6.04% 증가하였다.

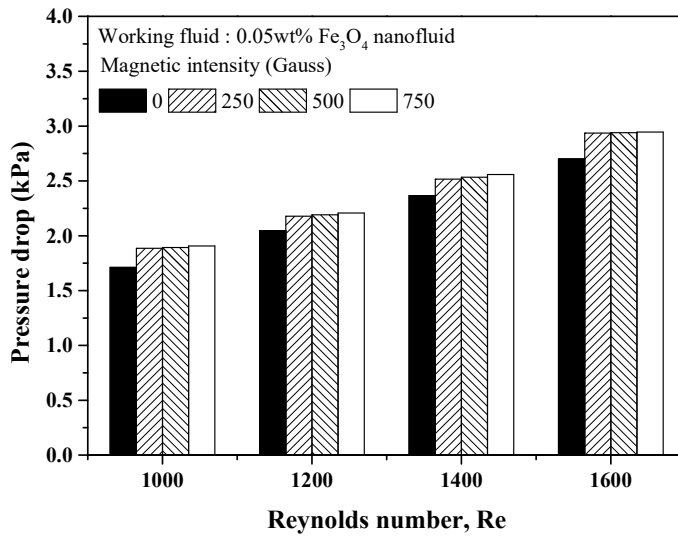
Fig. 3.4(d)는 0.2wt% Fe₃O₄ 나노유체의 자기장 변화에 따른 압력강하를 나타낸 그래프이다. 자기장 세기가 없을 때에도 나노입자의 첨가량이 많기 때문에 압력강하가 가장 높게 나타났으며, Re 수 1600에서 0.2wt% Fe₃O₄ 나노유체의 압력강하는 3.22 kPa로 나타났다. 자기장의 세기가 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.2wt% Fe₃O₄ 나노유체의 압력강하는 각각 3.35, 3.37, 3.39 kPa로 자기장이 없는 상태보다 각각 4.18%, 4.80%, 5.21% 증가하였다.

층류영역에서 Fe₃O₄ 나노유체의 농도가 증가할수록 압력강하가 증가하는 것을 확인 하였고, 자기장의 세기가 0 Gauss에서 250 Gauss로 증가할 때 Fe₃O₄ 나노유체의 압력강하는 급격하게 증가하였으나 자기장의 세기가 증가될수록 압력강하의 크기 변화는 미미한 정도로 증가하였다. 이는 자기장으로 인하여 벽면의

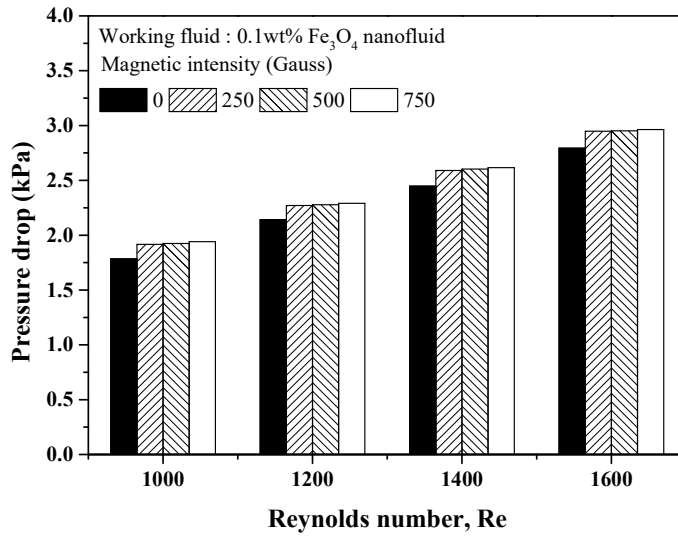
Fe_3O_4 나노입자들이 미세 난류를 형성하여 대류열전달계수를 향상시키고, 관내 속도가 다소 증가함에 따라 전단력이 증가하여 이로 인해 나노유체의 점성이 감소하여 압력강하의 증가가 미미하였다.



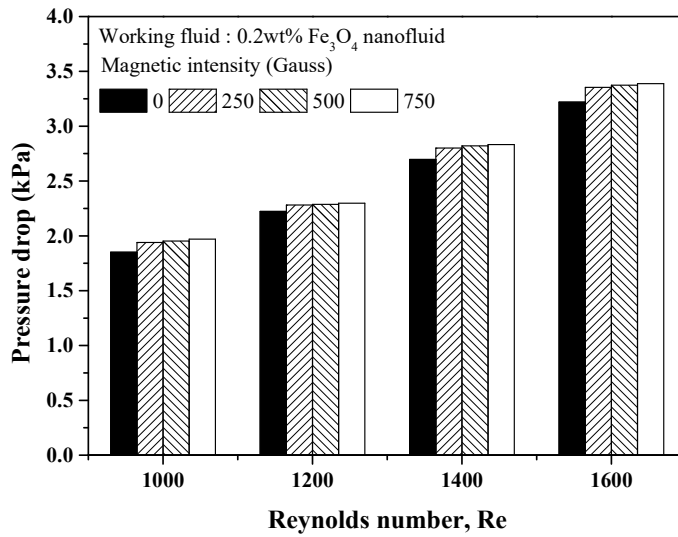
(a) 0.025wt% Fe_3O_4 nanofluid



(b) 0.05wt% Fe_3O_4 nanofluid



(c) 0.1wt% Fe_3O_4 nanofluid



(d) 0.2wt% Fe_3O_4 nanofluid

Fig. 3.4 Pressure drop of Fe_3O_4 nanofluid under an external magnetic field

제 3 절 자기장 세기에 따른 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체 적용 강제 대류열전달에 실험 결과

1. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달계수 변화

본 연구에서는 Fe_3O_4 단일 나노유체에 높은 열전도도 특성을 가지는 MWCNT 나노입자를 첨가하여 1대 1 비율의 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체를 제조하였다. 제조한 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달특성에 관한 실험을 진행하여 자기장이 없는 상태의 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체와 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달계수를 비교 하였다. Fig. 3.3은 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달계수의 변화를 보여주고 있다. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체에 자기장을 적용하였을 때 자기장을 적용하지 않았을 때보다 대류열전달계수가 전반적으로 향상되는 것을 확인하였다.

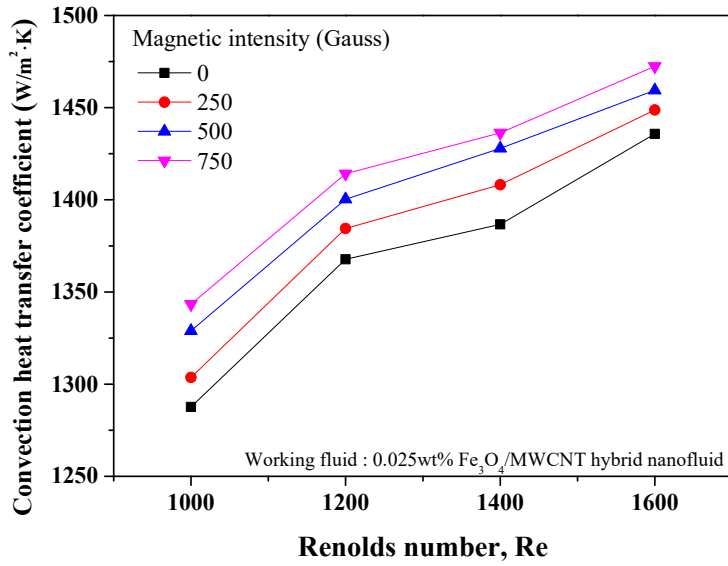
Fig. 3.5(a)와 (b)에서 Re 수가 1600일 때 자기장을 적용하지 않은 상태인 0 Gauss에서 0.025wt%와 0.05wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1436 와 1468 $\text{W/m}^2\text{K}$ 로 나타났다. 또한 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 동일한 Re 수 1600에서 0.025wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1449, 1459, 1472 $\text{W/m}^2\text{K}$ 이고, 0.05wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1481, 1496, 1509 $\text{W/m}^2\text{K}$ 로 나타났다. 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.025wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수는 자기장이 없는 상태인 0 Gauss 대비 각각 0.90%, 1.65%, 2.55%로 증가되며, 0.05wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수는 0 Gauss 대비 각각 0.94%, 1.93%, 2.79%로 증가됨을 확인하였다.

Fig. 3.5(c)는 0.1wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달계수의 변화를 보여주고 있다. 자기장이 없는 상태 0 Gauss 에서 Re 수가 1600 일 때, 0.1wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 대류열

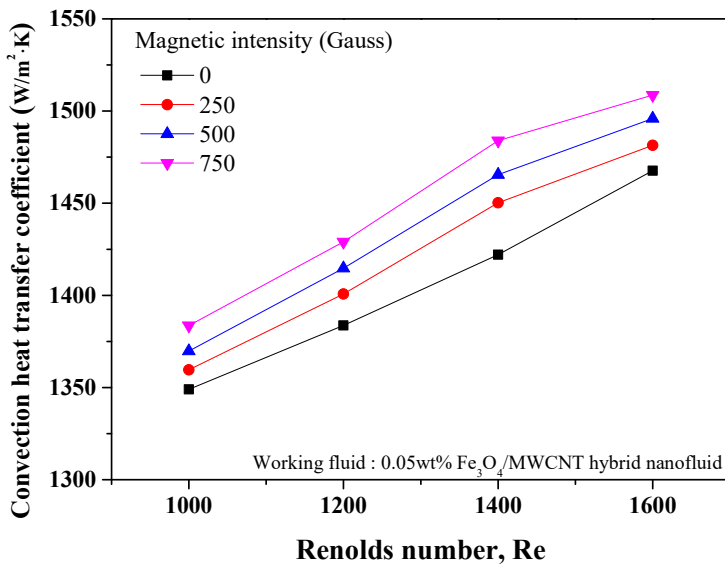
전달계수는 $1647 \text{ W/m}^2\text{K}$ 이다. 자기장을 각각 250, 500, 750 Gauss로 적용하였을 때 0.1wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1668, 1678, 1689 $\text{W/m}^2\text{K}$ 이다. 이는 자기장이 없는 0 Gauss일 때 보다 각각 1.28%, 1.83%, 2.55% 증가됨을 확인하였다. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 농도가 증가함에 따라 대류열전달계수가 증가하였으나 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 농도가 0.1wt%에서 0.2wt%로 증가할 때 대류열전달계수는 증가하지 않고 거의 비슷하거나 약간 감소하는 경향을 확인하였다.

Fig. 3.5(d)는 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 자기장 세기변화에 따른 대류열전달계수를 나타낸다. 자기장이 없는 0 Gauss에서 Re 수가 1600 일 때 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수는 $1580 \text{ W/m}^2\text{K}$ 이다. 자기장의 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1592, 1606, 1616 $\text{W/m}^2\text{K}$ 으로 자기장이 없을 때 대비 각각 0.74%, 1.61%, 2.24% 증가하였다. 0.1wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수와 자기장이 없는 0 Gauss에서 비교하였을 때 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수는 약 4% 감소함을 보였다.

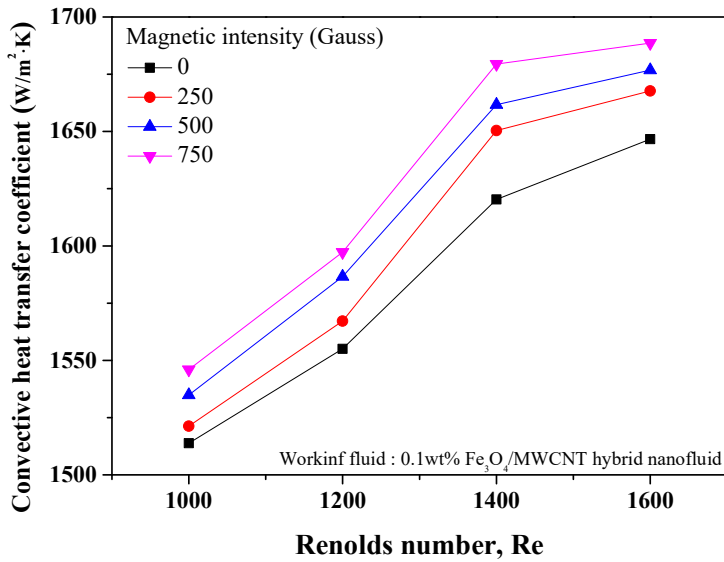
Fig. 3.1에서 자성 나노유체의 열전도도를 측정한 결과를 기반으로 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체에서 최대 대류열전달계수가 나타남을 예상하였으나 실험결과는 오히려 감소하는 경향을 보였다. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 농도가 0.1wt%에서 0.2wt%로 증가할 때 대류열전달계수는 증가하지 않는 이유는 나노유체의 농도가 증가할수록 열전도도는 증가하게 되지만 하이브리드 나노유체는 두 가지 이상의 나노입자를 합성하여 만든 나노유체로 단일 나노유체보다 분산안정성이 다소 떨어지기 때문이다. 또한 자기장으로 인해 나노입자들의 응집 현상이 발생하여 미세 난류가 형성되어 대류열전달계수가 증가할 수 있지만 한계량 보다 많은 양의 입자가 응집을 하게 되면 오히려 내벽과 유체 사이의 열전달을 차단하여 대류열전달이 감소될 수 있기 때문이다.



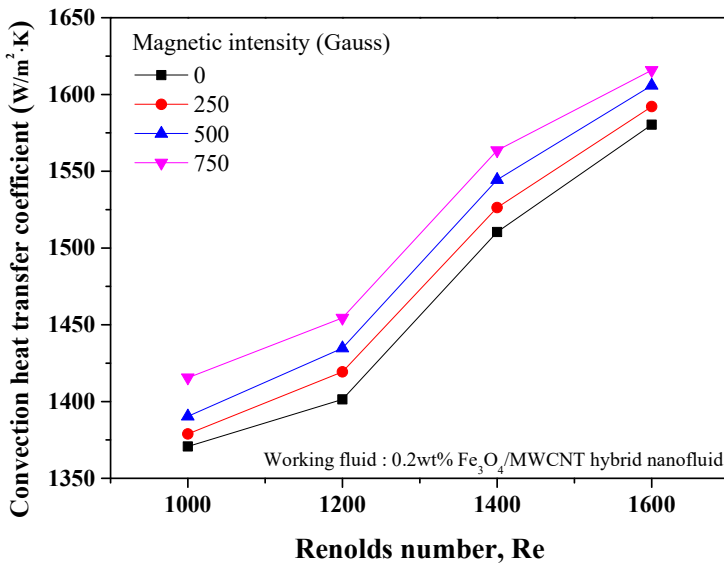
(a) 0.025wt% Fe₃O₄/MWCNT hybrid nanofluid



(b) 0.05wt% Fe₃O₄/MWCNT hybrid nanofluid



(c) 0.1wt% Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanofluid



(d) 0.2wt% Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanofluid

Fig. 3.5 Convective heat transfer coefficient of Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanofluid under an external magnetic field

2. Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nusselt number의 변화

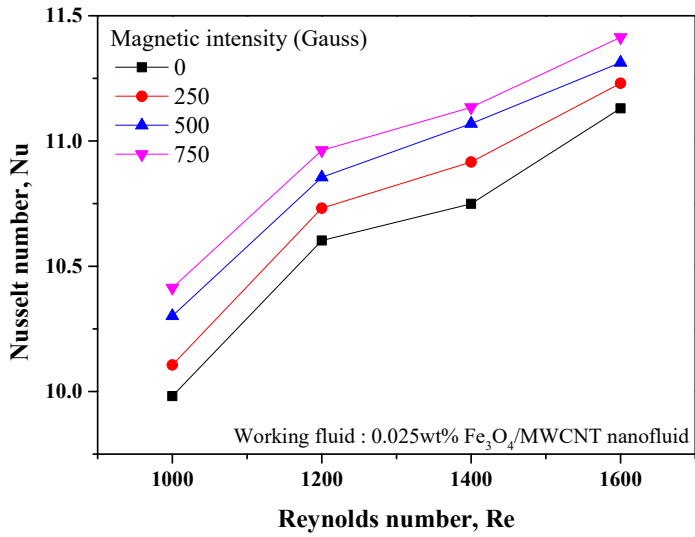
Fig. 3.6은 Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nusselt number의 변화를 보여주고 있다. Nusselt number의 경우 Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 농도가 0.1wt%에서 0.2wt%로 농도가 증가함에 따라 Nu 수가 감소하는 경향을 나타냈으며 이는 Fig. 3.4에서 확인한 대류열전달계수의 변화와 유사한 경향이 나타남을 확인하였다. Fig. 3.6(a)과 (b)는 0.025wt%와 0.05wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nu 수를 보여준다. 1600의 Re 수에서 자기장이 없는 상태의 0 Gauss에서 0.025wt%와 0.05wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수는 각각 11.1과 11.3이고, 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.025wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수는 각각 11.2, 11.3, 11.4 이다. 자기장이 없는 상태인 0 Gauss에서 0.025wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수와 비교하면 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.025wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수는 각각 0.90%, 1.65%, 2.55% 증가함을 확인하였다. 그리고 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때의 0.05wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수는 각각 11.4, 11.5, 11.6으로 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.05wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수는 자기장이 없는 상태의 0 Gauss에서 0.05wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수는 보다 각각 0.94%, 1.93%, 2.79% 증가하였다.

Fig. 3.6(c)은 0.1wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nu 수를 보여준다. Re 수가 1600에서 자기장 세기가 없는 0 Gauss에서 0.1wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수는 12.6이며, 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.1wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수는 각각 12.7, 12.8, 12.9로 나타났다. 자기장 없는 상태의 0.1wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수보다 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.1wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수가 각각 1.28%, 1.83%,

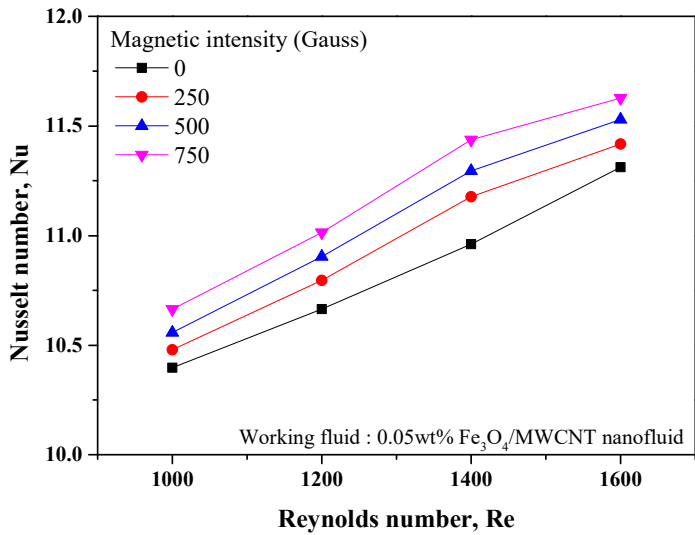
2.55% 증가함을 확인하였다.

Fig. 3.6(d)은 0.2wt% Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nu 수를 보여준다. Fig. 3.4(d)에서 0.2wt% Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수가 0.1wt% Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수보다 낮게 나타나는 것과 유사하게 0.2wt% Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수는 0.1wt% Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수보다 감소하는 경향을 확인하였다. 자기장의 세기가 0 Gauss인 0.2wt% Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수는 11.9로 0.1wt% Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수보다 5.33% 감소하였다. 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss인 경우 0.2wt% Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수는 각각 12.0, 12.1, 12.2로 나타났다. 자기장의 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.2wt% Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수는 자기장이 없는 0 Gauss에서 0.2wt% Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체의 Nu 수 대비 각각 0.74%, 1.61%, 2.24% 증가하는 것으로 확인되었다.

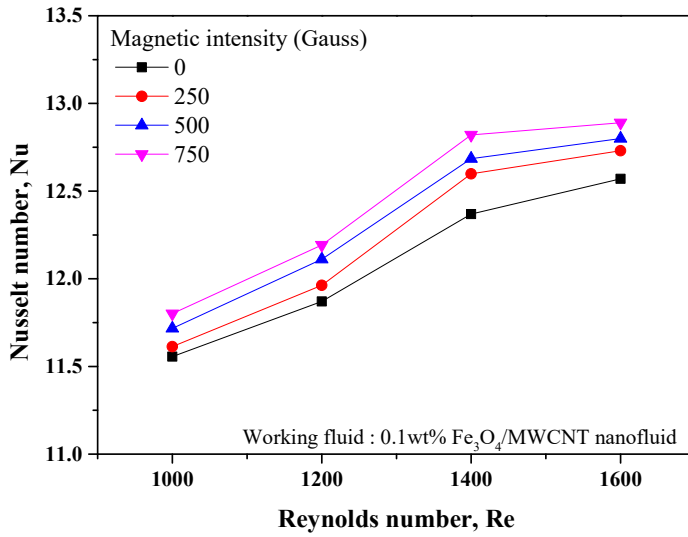
Fe_3O_4 /MWCNT 하이브리드 나노유체는 0.2wt%에서 분산안정성으로 인해 대류열전달계수 및 Nu 수가 다소 감소하는 경향을 보이지만 Fe_3O_4 나노유체를 적용하였을 때 보다 대류열전달 특성이 향상되었다. 일정한 자기장에서 자성 나노유체의 열전달 향상을 설명하기 위해 가장 널리 알려진 메커니즘은 자성 나노입자가 응집되어 열전달을 위한 낮은 열저항과 응집체와 유체 흐름 간의 상호작용을 통하여 외부 자기장 영향에 따른 대류열전달 증가로 기존의 연구와 유사한 결과를 보여주고 있다 [51,59]. 또한 Goharkhah et al. [51]은 튜브 근처의 입자들의 응집이 흐름 유형과 열 경계층을 방해하는 장애물처럼 작용하여 흐름을 난류로 만들어 대류열전달계수를 더욱 증가함을 보고하였다. 이를 바탕으로 본 연구에서 높은 열전도도를 가지는 MWCNT 나노입자의 첨가를 통해 Fe_3O_4 단일 나노유체보다 작동유체내의 입자들의 열전달이 활발하게 진행되며, 이와 더불어 외부 자기장을 통해 Fe_3O_4 나노입자의 응집 형태가 체인 모양으로 고정되어 그 주위로의 유체 흐름에서 미세 와류의 형성이 활발하게 되어 작동유체의 대류열전달 성능을 향상되는 것으로 판단된다.



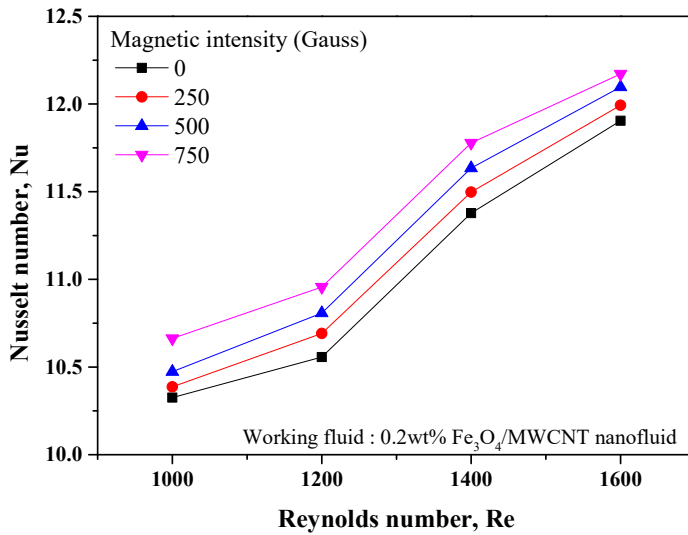
(a) 0.025wt% Fe₃O₄/MWCNT hybrid nanofluid



(b) 0.05wt% Fe₃O₄/MWCNT hybrid nanofluid



(c) 0.1wt% Fe₃O₄/MWCNT hybrid nanofluid



(d) 0.2wt% Fe₃O₄/MWCNT hybrid nanofluid

Fig. 3.6 Nusselt number of Fe₃O₄/MWCNT hybrid nanofluid under an external magnetic field

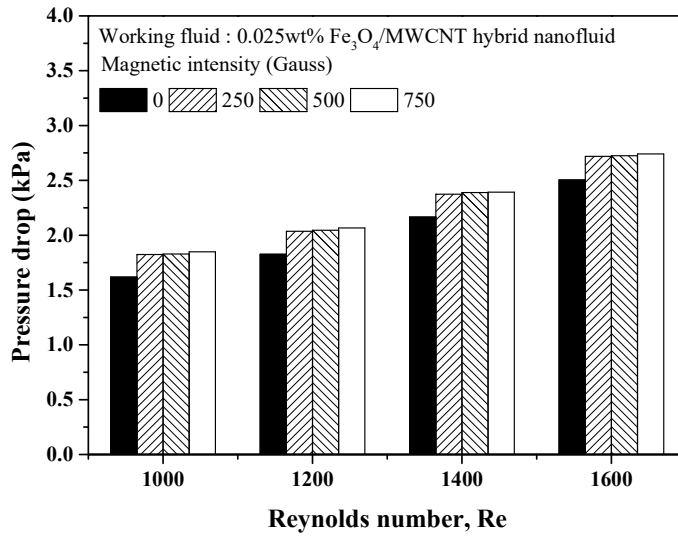
3. Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 압력강하의 변화

Fig. 3.7은 Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 압력강하를 보여주고 있다. Fe₃O₄ 자성 나노유체와 유사하게 Re 수가 증가함에 따라 압력강하가 증가함을 보였고, 자기장에 세기가 0 Gauss에서 250 Gauss으로 자기장의 세기가 증가할 때 압력강하가 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 우선 Fig. 3.7(a)과(b)는 0.025wt%와 0.05wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체를 적용하였을 때 자기장 세기 변화에 따른 압력강하를 보여준다. 0 Gauss로 자기장이 없을 때 Re 수가 1600에서 0.025wt%와 0.05wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 압력강하는 각각 2.50와 2.55 kPa이다. 동일한 Re 수 1600에서 0.025wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 자기장 세기 변화 따른 압력강하는 각각 250, 500, 750 Gauss에서 각각 2.72, 2.73, 2.74 kPa로 나타났으며, 자기장이 없는 상태 대비 각각 8.58%, 8.82%, 9.48% 증가되며, 0.05wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 자기장 세기 변화에 압력강하는 각각 2.68, 2.69, 2.70 kPa로 증가하며, 자기장이 없는 상태 대비 각각 5.22%, 5.45%, 6.07% 증가되었다.

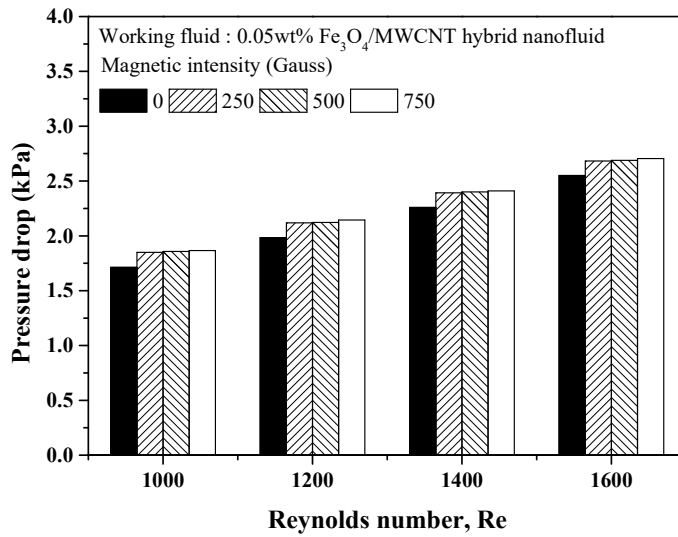
Fig. 3.7(c)은 0.1wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체를 적용하였을 때 자기장 세기 변화에 따른 압력강하를 보여주고 있다. 자기장의 세기가 0 Gauss 일 때 Re 수가 1600에서 0.1wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 압력강하는 2.64 kPa이다. 자기장의 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 압력강하는 각각 2.87, 2.89, 2.90 kPa로 자기장 세기가 0 Gauss 일 때 0.1wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 압력강하보다 4.26%, 4.90%, 5.18% 증가됨을 확인하였다.

Fig. 3.7(d)은 0.2wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체를 적용하였을 때 자기장 세기 변화에 따른 압력강하를 보여주고 있다. 자기장의 세기가 0 Gauss 일 때 Re 수가 1600에서 0.2wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 압력강하는 3.40 kPa로 나타났다. 동일한 Re 수인 1600에서 자기장의 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.2wt% Fe₃O₄/MWCNT 하이브리드 나노유체의 압력강하는 각각 3.55, 3.58, 3.60 kPa이고 자기장 세기가 0 Gauss에서의 0.2wt% Fe₃O₄/MWCNT 하

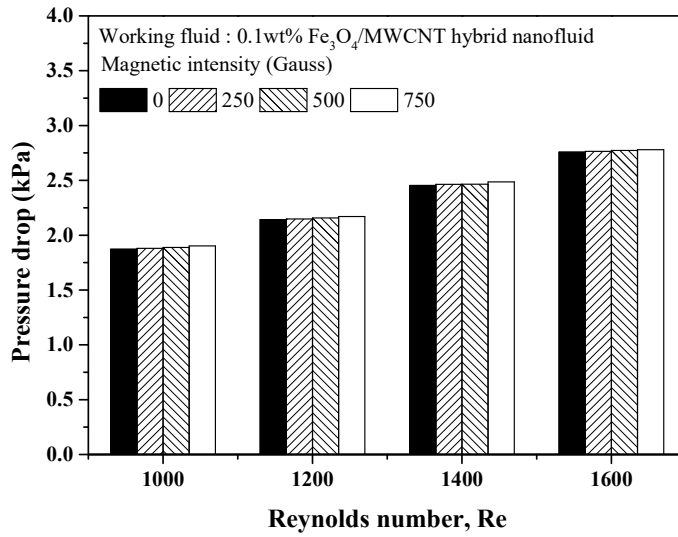
이브리드 나노유체의 압력강하보다 각각 4.56%, 5.52%, 5.89% 증가됨을 확인하였다. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 최대 열전달계수와 Nu 수는 0.1wt% 농도에서 나타났으나 최대 압력강하는 0.2wt% 농도에서 나타났다. 이와 같은 이유는 하이브리드 나노유체의 농도가 증가될수록 열전도도가 증가되지만 점도 또한 증가되며, 자기장으로 인해 두 가지 나노입자의 분산안정성이 감소되어, 압력강하가 증가되기 때문에 열전달 성능이 감소되고 이에 대류열전달계수가 감소하는 것으로 판단된다.



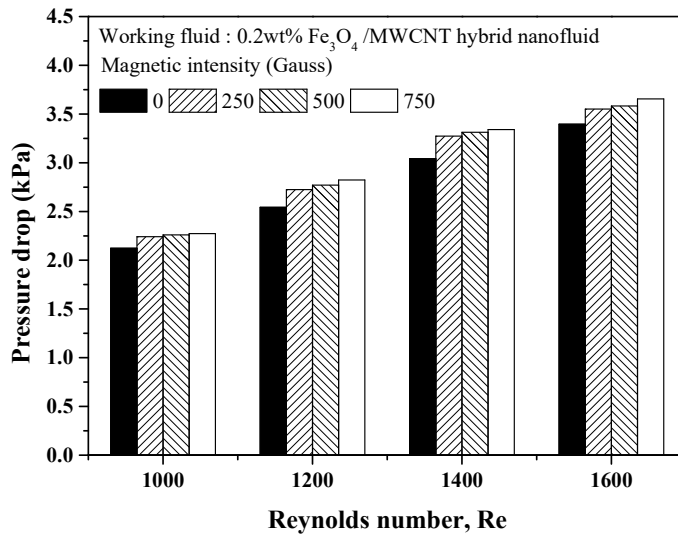
(a) 0.025wt% Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanofluid



(b) 0.05wt% Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanofluid



(c) 0.1wt% Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanofluid



(d) 0.2wt% Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanofluid

Fig. 3.7 Pressure drop of Fe_3O_4 /MWCNT hybrid nanofluid under an external magnetic field

제 4 절 자기장의 세기에 따른 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체 적용 강제 대류열전달의 실험 결과

1. $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달계수의 변화

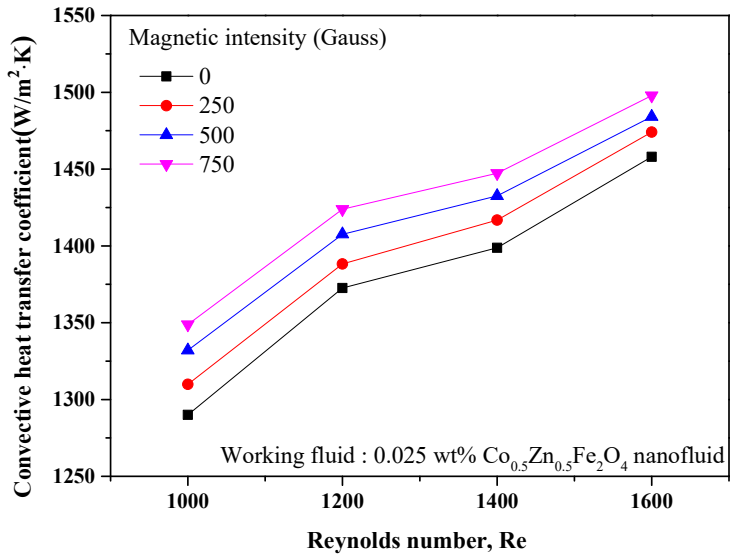
본 연구에서는 자성 나노유체 중 하나인 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체를 적용하여 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달 실험을 진행하였으며, Fe_3O_4 나노유체와 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체에서 적용한 농도와 동일한 0.025wt%, 0.05wt%, 0.1wt%, 0.2wt%로 제조하여 대류열전달 실험을 진행하였다. Fig. 3.8은 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달계수를 나타냈으며, 자기장 세기가 증가 될수록 대류열전달계수가 증가하는 경향을 확인하였다. 먼저 자기장의 세기가 없는 상태에서 0.025wt%, 0.05wt%, 0.1wt%, 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 최대 대류열전달계수는 Re 수 1600에서 확인되었으며, 각각 1458, 1478, 1594, 1658 $\text{W/m}^2\text{K}$ 로 나타났다. 그 중에서 Fe_3O_4 나노유체와 유사하게 0.2wt%에서 최대 대류열전달계수가 나타남을 확인하였다.

Fig. 3.8(a)을 보면 0.025wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달계수를 확인 할 수 있으며, 최대 대류열전달계수가 확인된 Re 수 1600에서 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때의 대류열전달계수는 각각 1474, 1484, 1498 $\text{W/m}^2\text{K}$ 로 자기장이 없는 상태의 0.025wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수 대비 1.10%, 1.79%, 2.73% 증가함을 확인하였다.

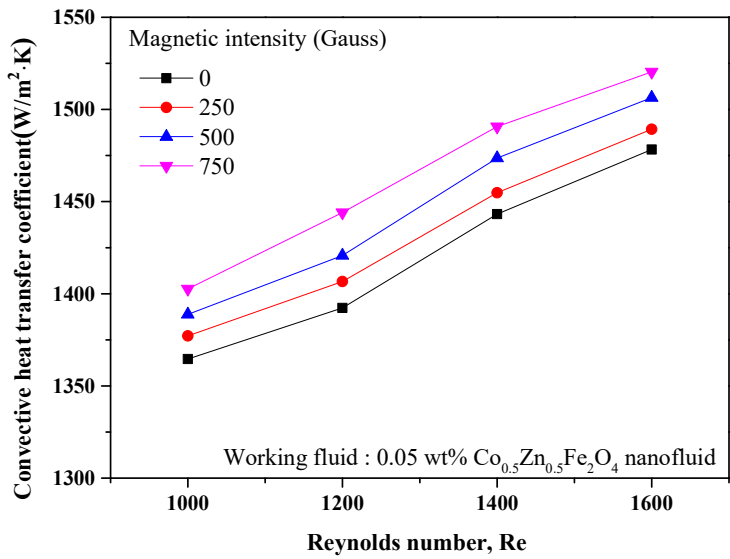
Fig. 3.8(b)은 0.05wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달계수이며, 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때의 대류열전달계수는 각각 1489, 1506, 1520 $\text{W/m}^2\text{K}$ 로 자기장의 세기가 0 Gauss 일 때의 0.05wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수 대비 각각 0.75%, 1.90%, 2.85% 향상되었다.

Fig. 3.8(c)과 (d)는 0.1wt%와 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 대류열전달계수이며, 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때,

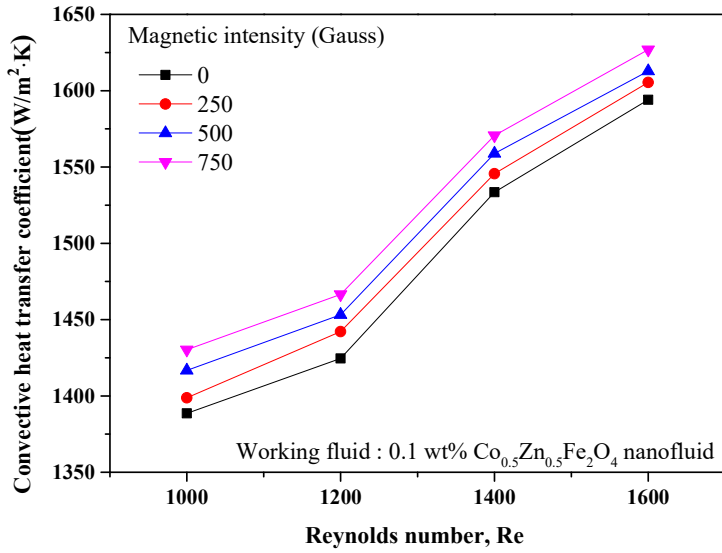
0.1wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1605, 1613, 1627 $\text{W/m}^2\text{K}$ 로 나타났으며, 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1681, 1688, 1701 $\text{W/m}^2\text{K}$ 로 확인되었다. 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss의 0.1wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수는 자기장의 세기가 0 Gauss에서의 0.1wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수 대비 각각 0.71%, 1.18%, 2.06% 향상되었고, 마찬가지로 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수 또한 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss의 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수가 자기장의 세기가 0 Gauss에서 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수 보다 각각 1.40%, 1.83%, 2.63% 향상됨을 확인하였다.



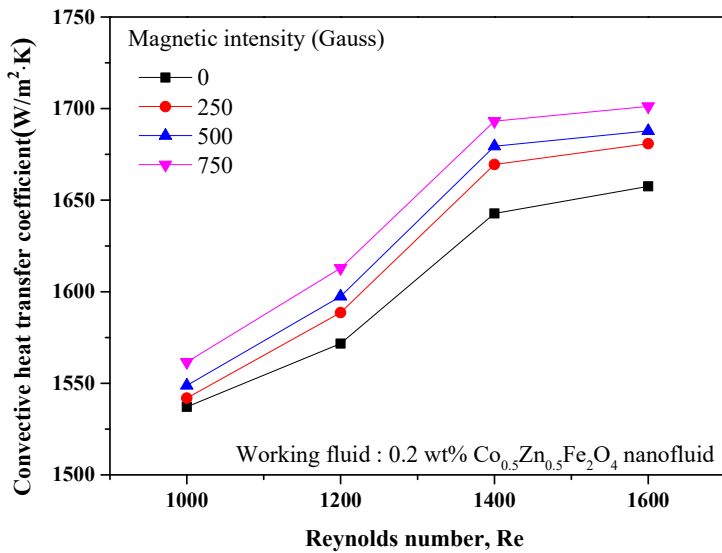
(a) 0.025wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid



(b) 0.05wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid



(c) 0.1wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid



(d) 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid

Fig. 3.8 Convective heat transfer coefficient of $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid under an external magnetic field

2. $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nusselt number의 변화

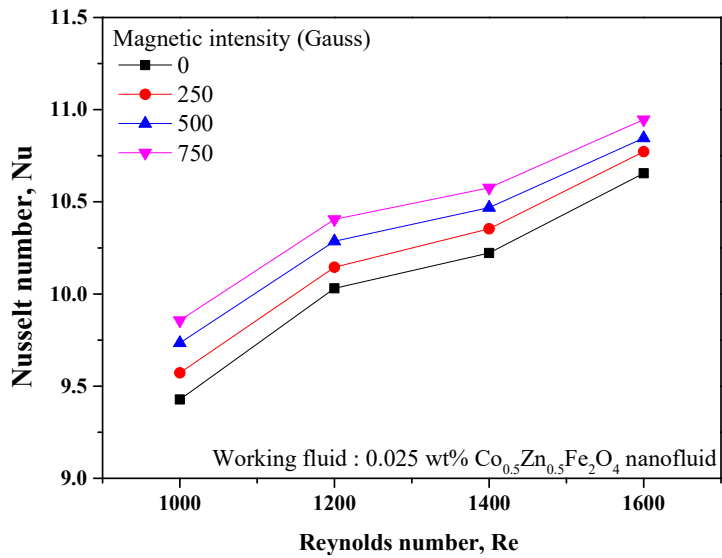
Fig. 3.9는 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nu 수의 변화를 나타내며, Fig. 3.8에서 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수와 동일한 경향이 나타남을 확인하였다. 자기장이 없는 상태에서 최대 Nu 수가 나타난 Re 수 1600에서 0.025wt%, 0.05wt%, 0.1wt%, 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 Nu 수는 각각 11.2, 11.3, 12.1, 12.5로 나타났다.

Fig. 3.9(a)는 0.025wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nu 수를 나타냈으며, 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.025wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 Nu 수는 각각 11.32, 11.39, 11.50로 나타났다. 자기장이 없는 0 Gauss에서 0.025wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 Nu 수 대비 자기장의 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.025wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 Nu 수는 각각 1.10%, 1.79%, 2.73%로 증가하였다.

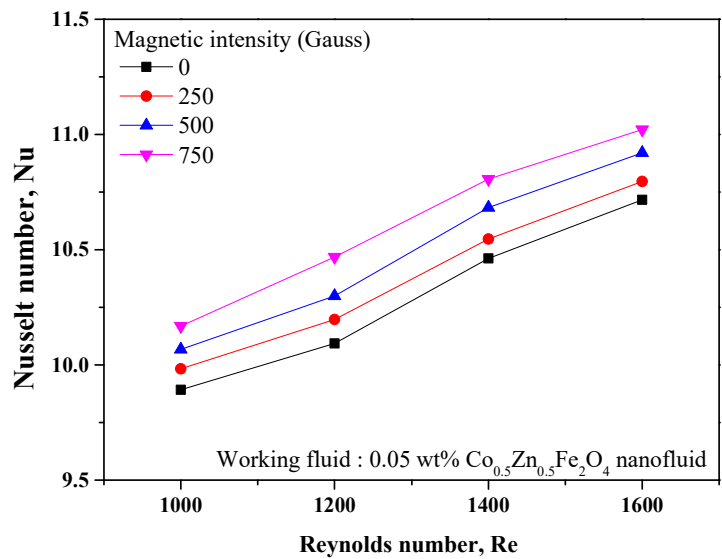
Fig. 3.9(b)와 (c)는 0.05wt%와 0.1wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nu 수를 나타내며, 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때, 0.05wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 Nu 수는 각각 11.4, 11.5, 11.6으로 나타났고, 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss에서 0.05wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 Nu 수는 자기장 세기가 없는 0 Gauss에서 0.05wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 Nu 수보다 각각 0.75%, 1.90%, 2.85% 향상됨을 나타냈다. 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss에서 0.1wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 Nu 수는 각각 12.1, 12.2, 12.3으로 나타났으며, 자기장이 0 Gauss일 때 0.1wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 Nu 수보다 각각 0.71%, 1.18%, 2.06% 향상되었다.

Fig. 3.9(d)는 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 Nu 수를 나타냈고, 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 Nu 수는 각각 12.6, 12.7, 12.8로 나타났다. 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체 Nu 수는 자기장이 없을 때의 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체 Nu 수 보다 자기장 세기가

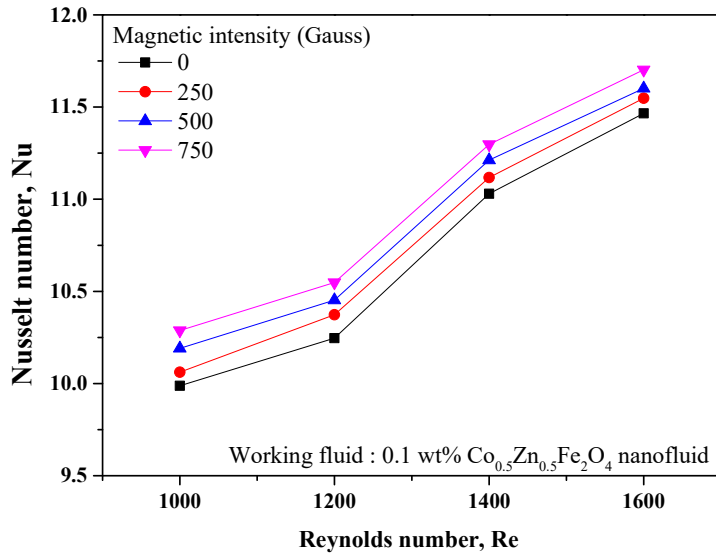
각각 250, 500, 750 Gauss 일 때의 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 Nu 수가 각각 1.41%, 1.83%, 2.64% 향상됨을 확인하였다.



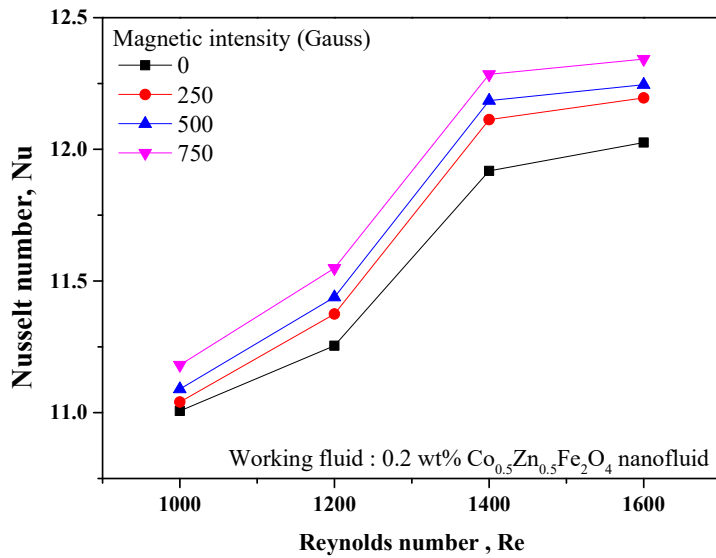
(a) 0.025wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid



(b) 0.05wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid



(c) 0.1wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid



(d) 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid

Fig. 3.9 Nusselt number of $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid under an external magnetic field

3. $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 압력강하의 변화

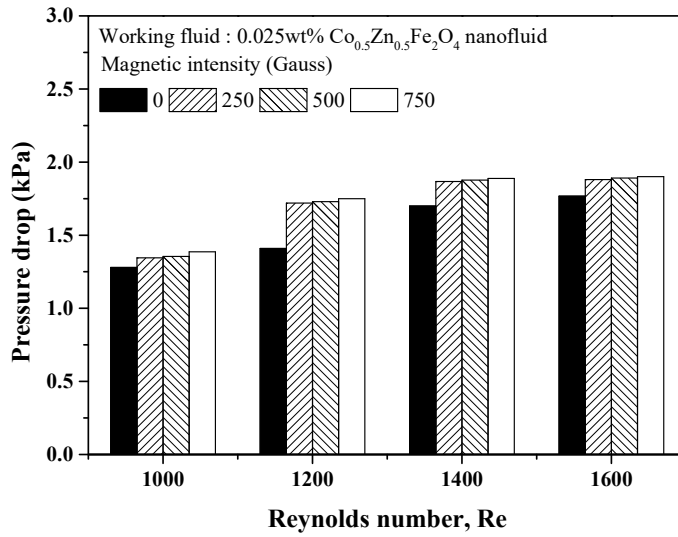
Fig. 3.10은 자기장 세기 변화에 따른 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하의 변화를 나타내며, Fe_3O_4 나노유체와 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 압력강하의 경향과 동일하게 자기장 세기가 증가함에 따라 압력강하가 증가하는 경향을 확인하였다. 자기장의 세기가 0 Gauss 일 때 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하가 가장 높게 나타난 Re 수 1600의 0.025wt%, 0.05wt%, 0.1wt%, 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하는 각각 1.77, 1.82, 1.84, 1.87 kPa로 나타났다.

Fig. 3.10(a)은 0.025wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 압력강하를 나타낸다. 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.025wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하는 각각 1.88, 1.89, 1.90 kPa로 나타났다. 자기장이 없는 상태에서 0.025wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하와 비교하여 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.025wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하는 각각 6.43%, 7.00%, 7.56%가 증가함을 확인하였다.

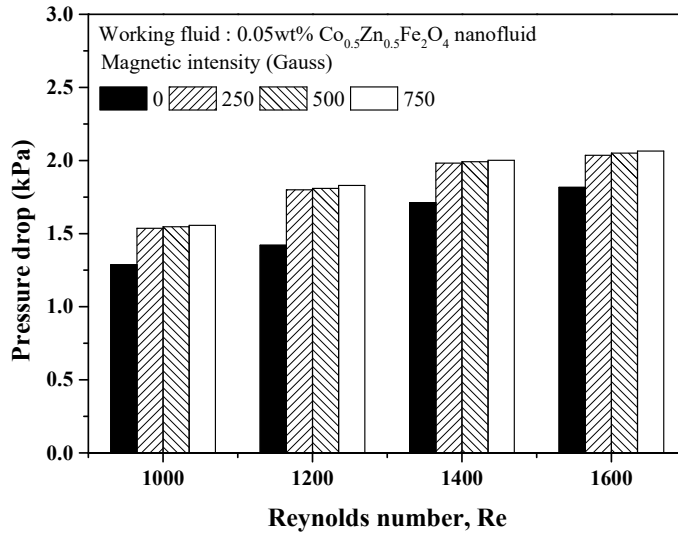
Fig. 3.10(b)과 (c)는 0.05wt%와 0.1wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 압력강하를 보여주고 있다. 자기장의 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.05wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하는 각각 2.04, 2.05, 2.06 kPa로 나타나며, 자기장의 영향이 없을 때의 0.05wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하와 비교하였을 때 각각 12.1%, 12.9%, 13.7% 향상됨을 보였다. 0.1wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하는 자기장의 세기 변화에 따라 각각 2.10, 2.12, 2.15 kPa로 확인되었으며, 자기장의 세기가 0 Gauss 일 때 0.1wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하와 비교 했을 때 자기장 세기 변화에 따른 0.1wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하는 각각 14.2%, 15.3%, 17.0% 향상되었다.

Fig. 3.10(d)은 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 압력강하를 나타낸다. 자기장 세기가 각각 250, 500, 750 Gauss 일 때 0.2wt%

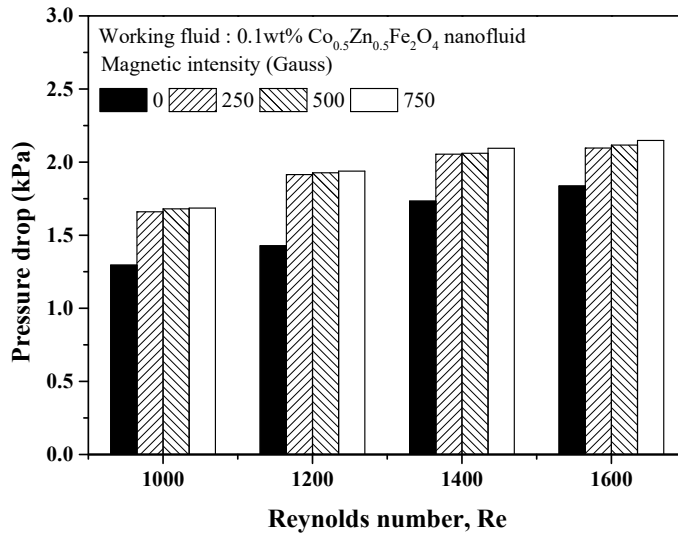
$\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하는 각각 2.19, 2.20, 2.23 kPa로 자기장의 세기가 없을 때의 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하 보다 각각 17.1%, 17.6%, 19.7% 향상되었다. Fe_3O_4 나노유체와 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 압력강하 보다 자기장의 세기가 증가함에 따라 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하가 급격하게 증가하는 경향을 보이나 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하는 2.5 kPa 미만으로 전체적으로 작은 압력강하를 나타냈다. 또한 자기장 세기가 증가할수록 작동유체의 압력강하가 증가하는 이유는 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노입자들의 응집이 벽면에 미세 난류들이 활발하게 형성하여 유체의 흐름을 방해하기 때문이다.



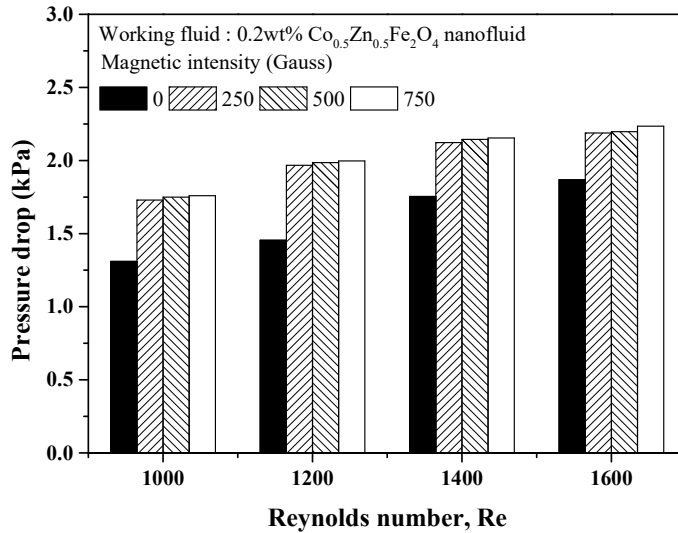
(a) 0.025wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid



(b) 0.05wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid



(c) 0.1wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid



(d) 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid

Fig. 3.10 Pressure drop of $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanofluid under an external magnetic field

제 5 절 다양한 자성 나노유체 적용에 따른 강제 대류열전달에 미치는 자기장 효과 비교 분석

1. 다양한 자성 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 최대 대류열전달계수 비교 고찰

본 연구에서는 다양한 자성 나노유체를 적용하여 대류열전달 특성에 미치는 자기장 효과에 대하여 분석하였다. 작동유체로 Fe_3O_4 나노유체, $Fe_3O_4/MWCNT$ 하이브리드 나노유체, $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 나노유체를 사용하였으며, 자기장 세기는 각각 250, 500, 750 Gauss로 적용하여 실험을 진행하였다. 각 자성 나노유체별 최대 대류열전달계수가 나타난 농도에서 대류열전달 경향을 비교 고찰하였다. 이전의 결과에 제시하였듯이 Fe_3O_4 나노유체와 $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 나노유체는 농도가 0.2wt%에서 최대 대류열전달계수가 나타났으며, $Fe_3O_4/MWCNT$ 하이브리드 나노유체는 농도가 0.1wt%에서 최대 대류열전달계수가 나타났다. 최대 대류열전달계수가 나타난 결과를 Fig. 3.10에 나타냈으며, 자성 나노유체들의 대류열전달계수를 비교 하였을 때, 0.2wt% $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 나노유체를 적용하였을 때 최대 대류열전달계수가 나타남을 확인하였다.

먼저 Fig. 3.11(a)은 0 Gauss에서 자성 나노유체들의 대류열전달계수를 비교하여 보여주고 있다. Re 수가 각각 1000, 1200, 1400, 1600로 증가할 때 0.2wt% $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1537, 1572, 1643, 1658 W/m^2K 로 증가하였으며, 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1492, 1535, 1597, 1617 W/m^2K 로 증가하는 것으로 나타났다. 이 때 0.1wt% $Fe_3O_4/MWCNT$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1514, 1555, 1620, 1647 W/m^2K 이 나타났다. Re 수가 각각 1000, 1200, 1400, 1600로 증가하였을 때 0.2wt% $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 나노유체의 대류열전달계수는 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체의 대류열전달계수보다 각각 3.06%, 2.38%, 2.86%, 2.51%로 크게 나타났으며, 0.1wt% $Fe_3O_4/MWCNT$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수와 비교 하였을 때 각각

1.54%, 1.07%, 1.38%, 0.66% 크게 나타남을 확인하였다.

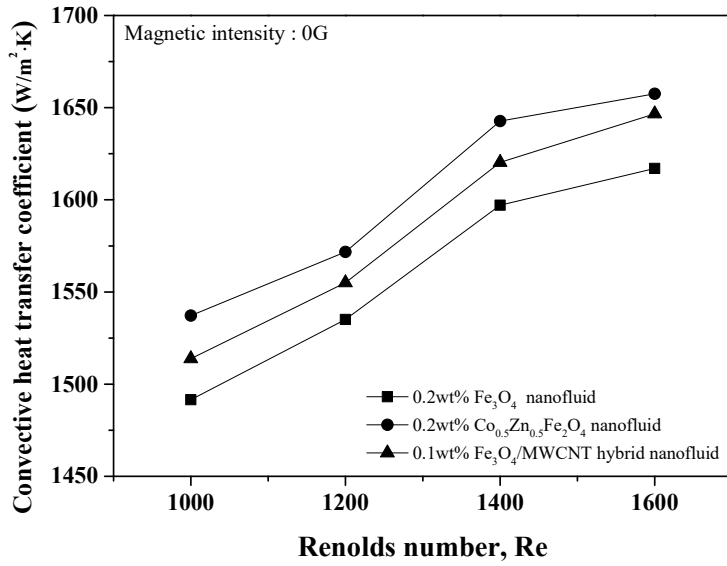
Fig. 3.11(b)은 자기장의 세기가 250 Gauss 일 때 자성 나노유체들의 대류열전달계수를 비교하여 보여주고 있다. Re 수가 각각 1000, 1200, 1400, 1600로 증가함에 따라 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1542, 1589, 1670, 1681 $\text{W/m}^2\text{K}$ 로 증가하였다. 또한 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체의 Re 수에 따른 대류열전달계수는 각각 1506, 1548, 1618, 1643 $\text{W/m}^2\text{K}$ 로 증가하였으며, 0.1wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 Re 수에 따른 대류열전달계수는 1521, 1567, 1650, 1667 $\text{W/m}^2\text{K}$ 로 나타났다. 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수를 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체의 대류열전달계수와 Re 수 변화에 따라 비교하였을 때 각각 2.41%, 2.62%, 3.19%, 2.28% 크게 나타나며, 0.1wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수와 비교 하였을 때는 각각 1.35%, 1.36%, 1.16%, 0.79%로 크게 나타났다.

Fig. 3.11(C)은 자기장의 세기가 500 Gauss 일 때 자성 나노유체들의 대류열전달계수의 변화를 비교하여 보여주고 있다. 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수를 Re 수가 각각 1000, 1200, 1400, 1600로 증가함에 따라 대류열전달계수는 각각 1549, 1597, 1679, 1688 $\text{W/m}^2\text{K}$ 로 증가하였다. 또한 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1516, 1564, 1630, 1661 $\text{W/m}^2\text{K}$ 로 나타났으며, 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수와 Re 수가 증가함에 따라 비교하였을 때 각각 2.14%, 2.16%, 3.00%, 1.60%로 감소하는 것으로 나타났다. 마찬가지로 0.1wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수는 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수와 Re 수가 증가함에 따라 비교하였을 때 각각 0.90%, 0.68%, 1.07%, 0.66% 감소하여 1535, 1586, 1662, 1677 $\text{W/m}^2\text{K}$ 로 나타났다.

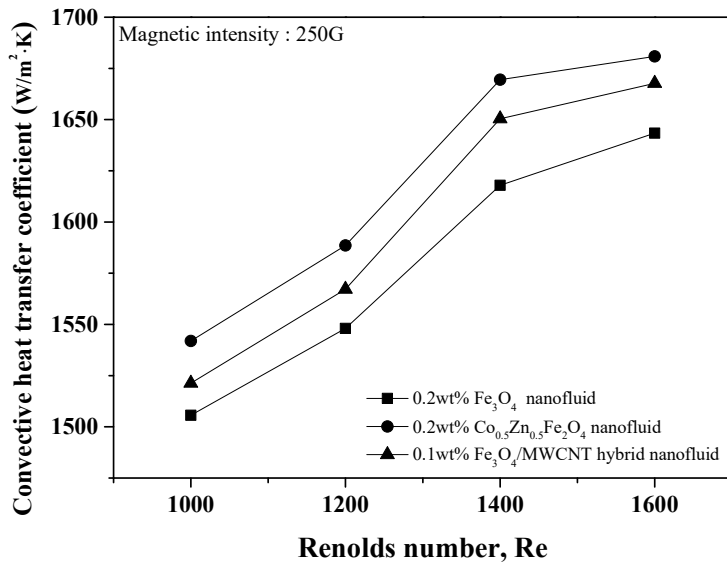
Fig. 3.11(d)은 자기장 세기가 750 Gauss 일 때 자성 나노유체들의 대류열전달계수를 비교하여 보여주고 있다. 전체적으로 자기장세기 변화에 따른 대류열전달계수를 비교하였을 때 3 가지 자성 나노유체들 전부 750 Gauss에서 최대 대류열전달계수가 나타났다. Re 수가 각각 1000, 1200, 1400, 1600 일 때 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1534, 1578, 1654, 1676 $\text{W/m}^2\text{K}$ 이고, 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1562, 1613, 1693, 1701 $\text{W/m}^2\text{K}$

로 나타났다. 또한 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수는 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체의 대류열전달계수 보다 각각 1.78%, 2.19%, 2.37%, 1.49% 높게 나타났다. 그리고 0.1wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 대류열전달계수는 각각 1546, 1598, 1679, 1688 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 로 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 대류열전달계수와 비교하였을 때 각각 1.01%, 0.98%, 0.82%, 0.75%로 감소함을 확인하였다.

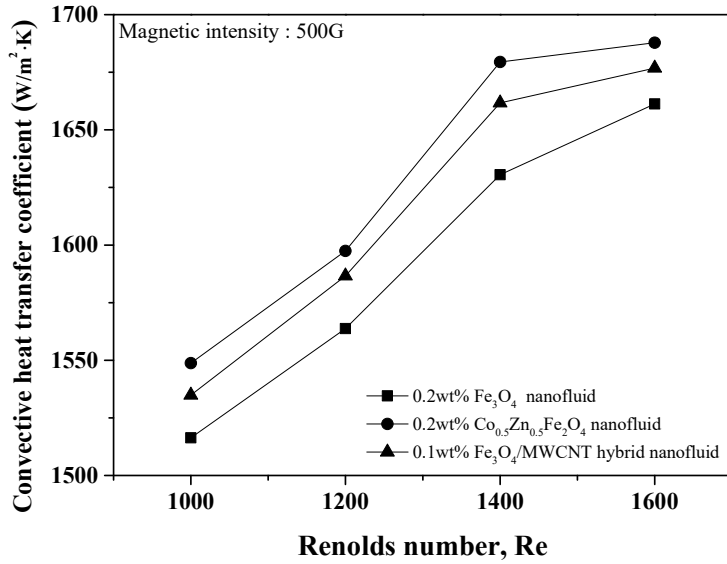
각각의 자성 나노유체의 최대 대류열전달계수가 나타난 농도에서 대류열전달계수를 비교하였을 때 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체에서 최대 대류열전달계수가 나타났으며 이는 Fig. 3.1에서 보여주었듯이 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 열전도도가 다른 자성 나노유체들보다 크기 때문이다. 또한 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체와 비교하여 보았을 때 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 단일 나노유체로 제조되었기 때문에 고농도에서 보다 높은 분산안정성을 가지기 때문으로 사료된다.



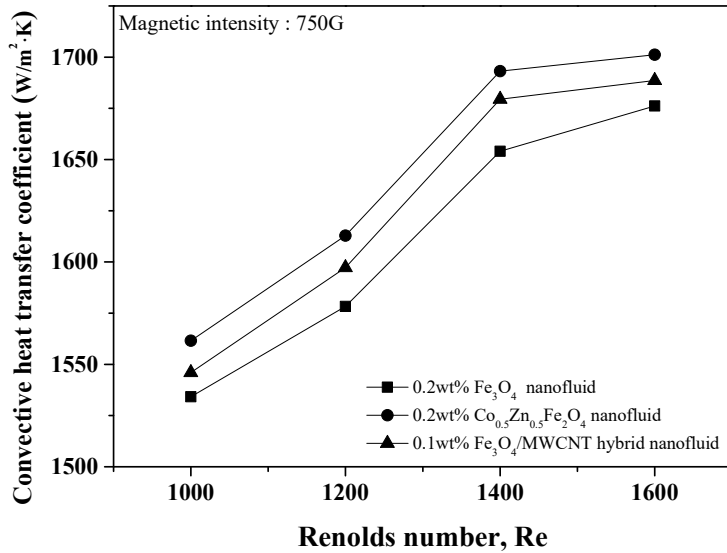
(a) 0 Gauss



(b) 250 Gauss



(c) 500 Gauss



(d) 750 Gauss

Fig. 3.11 Comparison of convective heat transfer coefficients of magnetic nanofluids according to magnetic field effects

2. 다양한 자성 나노유체의 자기장 세기 변화에 따른 압력강하 비교 고찰

Fig. 3.12는 자기장 세기변화에 따른 최대 압력강하가 나타난 자성 나노유체의 농도에서 압력강하 특성을 비교하여 보여주고 있다. 단일 자성 나노유체의 경우 Fig. 3.11에서 최대 대류열전달계수가 나타난 농도와 동일하게 농도가 0.2wt%에서 최대 압력강하가 나타났으나 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체는 최대 대류열전달계수가 나타난 0.1wt%의 농도가 아닌 0.2wt%에서 최대 압력강하가 나타났다. 또한 3 종류의 자성 나노유체 중 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 압력강하가 가장 크게 나타났으며, 최대 대류열전달계수가 나타난 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하는 가장 작게 나타났다.

Fig. 3.12(a)는 자기장의 세기가 0 Gauss에서 자성 나노유체들의 압력강하를 비교하여 보여주고 있다. Re 수가 각각 1000, 1200, 1400, 1600로 증가할 때 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 압력강하는 각각 2.12, 2.54, 3.04, 3.40 kPa로 증가하였으며, 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체의 압력강하는 각각 1.85, 2.22, 2.70, 3.22 kPa로 증가하는 것으로 나타났다. 이 때 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하는 각각 1.31, 1.45, 1.75, 1.87 kPa로 나타났다. 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체와 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하를 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 압력강하와 Re 수 변화에 따라 비교하였을 때, 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체의 압력강하는 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 압력강하보다 각각 14.7%, 14.4%, 12.8%, 5.45% 감소함을 보였으며, 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하는 각각 62%, 74.8%, 73.4%, 81.8% 감소함을 보였다.

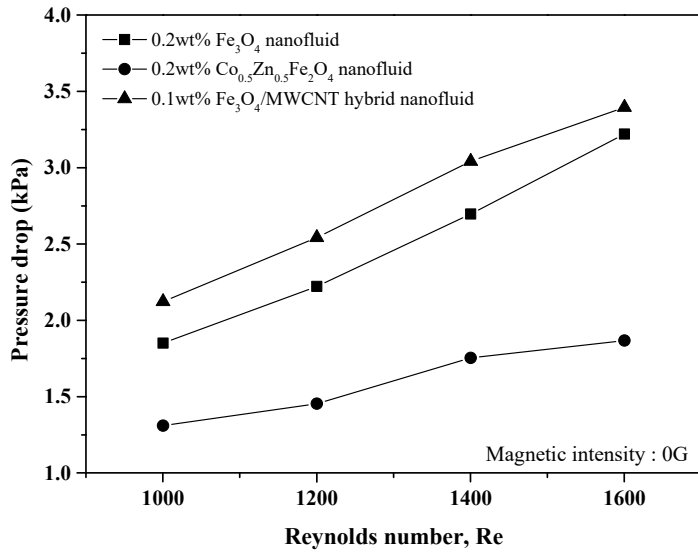
Fig. 3.12(b)는 자기장의 세기가 250 Gauss에서 자성 나노유체들의 압력강하를 비교하여 보여주고 있다. Re 수가 각각 1000, 1200, 1400, 1600로 증가할 때, 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하는 각각 1.73, 1.97, 2.12, 2.19 kPa로 나타났으며, 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체의 압력강하는 각각 1.94, 2.28, 2.80, 3.35 kPa로 나타났다. 이 때 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 압력강하는 각

각 2.24, 2.72, 3.27, 3.55 kPa로 나타났으며, 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하와 비교하였을 때 Re 수 1600에서 최대 62.3% 향상됨을 확인하였다. 또한 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 압력강하와 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체의 압력강하를 비교하면, Re 수 1200에서 최대 19.4% 증가함을 보이며, Re 수 1600에서는 최소 5.84% 증가함이 나타났다.

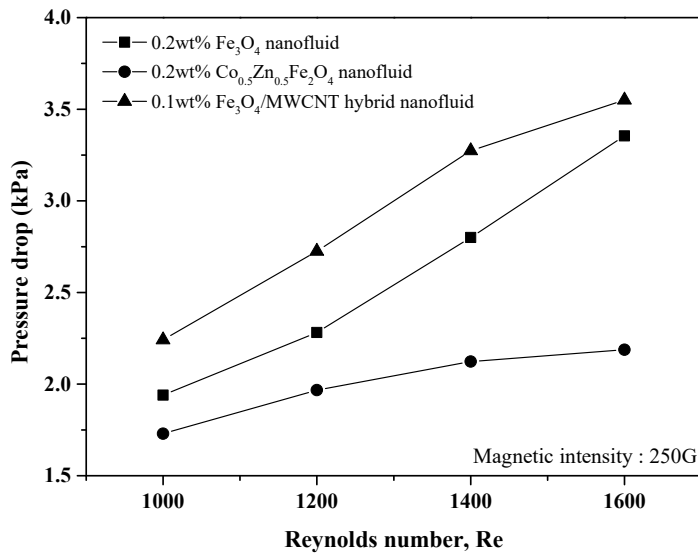
Fig. 3.12(c)는 자기장의 세기가 500 Gauss에서 자성 나노유체들의 압력강하를 비교하여 보여주고 있다. 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체 압력강하는 Re 수가 증가함에 따라 각각 1.75, 1.99, 2.14, 2.20 kPa로 나타났으며, 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체의 압력강하는 각각 1.95, 2.29, 2.82, 3.37 kPa로 나타났다. 이 때 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 압력강하는 Re 수가 증가함에 따라 각각 2.26, 2.77, 3.31, 3.58 kPa로 나타났다. 여기서 가장 큰 압력강하는 Re 수 1600에서 나타났으며, 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 압력강하는 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체 압력강하보다 54.5% 크게 나타나며, 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체의 압력강하와 비교하였을 때는 6.14% 크게 향상됨이 나타났다.

Fig. 3.12(d)는 자기장의 세기가 750 Gauss에서 자성 나노유체들의 압력강하를 비교하여 보여주고 있다. Re 수가 1600 일 때 가장 큰 압력강하가 발생되었으며, 각각 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체, 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체, 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 압력강하는 각각 2.23, 3.39, 3.60 kPa로 나타났다. 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체의 압력강하는 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 압력강하보다 60.9% 크게 나타나며, 0.2wt% Fe_3O_4 나노유체보다는 6.14% 크게 나타났다.

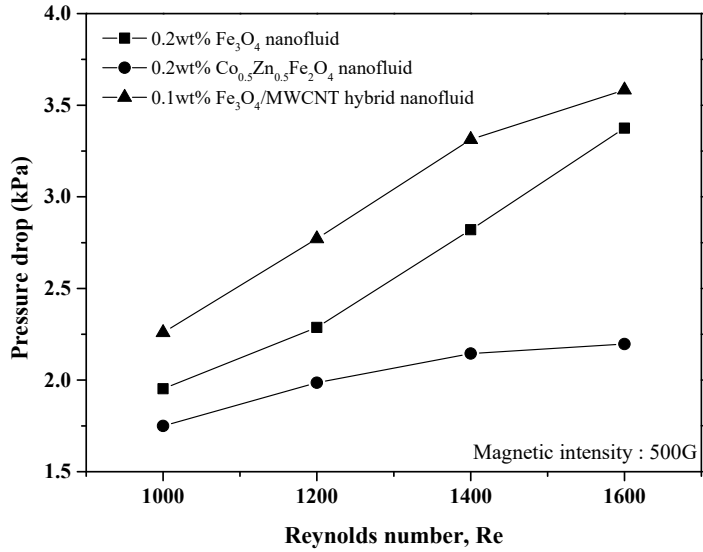
압력강하는 관 내 작동유체의 점도에 따라 크게 달라지며, 관내 작동유체의 온도 또한 압력강하의 중요한 변수이다 [60]. 이를 통해 본 연구에서 자성 나노유체의 농도가 증가하면 점도가 증가하여 압력강하가 증가하는 경향을 보였다. 3종류의 자성 나노유체 중에서 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체의 경우 압력강하가 낮게 나타났다. 이는 두 자성 나노유체와 비교하여 점도가 낮기 때문이다. 또한 다른 자성 나노유체에 비하여 상대적으로 높은 열전도도뿐만 아니라 외부 자기장의 영향으로 관내 대류열전달 특성이 향상되어 관내 작동유체의 온도가 증가하여 자성 나노유체의 점성이 낮아지며 이에 압력강하가 감소하는 것으로 판단된다.



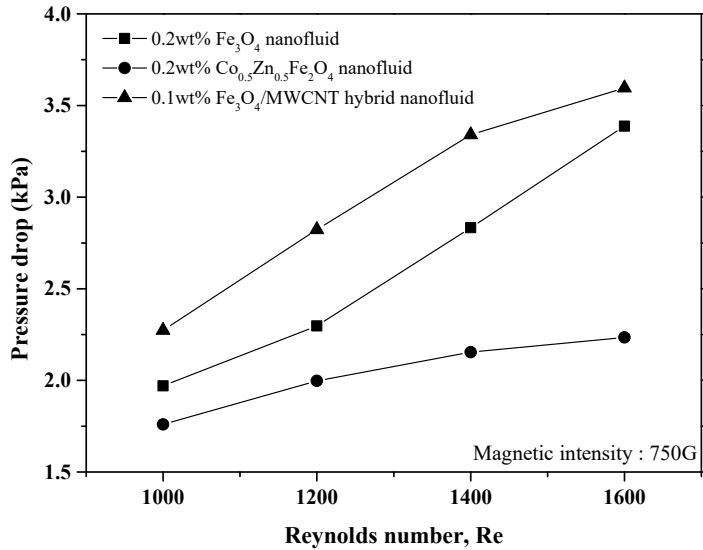
(a) 0 Gauss



(b) 250 Gauss



(c) 500 Gauss



(c) 750 Gauss

Fig. 3.12 Comparison of pressure drop of magnetic nanofluids according to magnetic field effects

제 4장 결론

본 논문에서는 물과 에틸렌글리콜을 80:20의 비율로 기본유체를 제작하였고, 자성 나노유체로 Fe_3O_4 나노유체 및 $Fe_3O_4/MACNT$ 하이브리드 나노유체 그리고 $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ 나노유체를 0.025wt%, 0.05wt%, 0.1wt%, 0.2wt%의 농도로 제조하여 자기장의 세기 대한 대류열전달 특성을 실험적으로 고찰하였다. 본 연구에서 자기장의 세기에 따른 대류열전달 특성을 확인하기 위하여 적용한 자기장 세기는 각각 250 Gauss, 500 Gauss, 750 Gauss 이다. 제조된 나노유체는 약 1개월 동안 분산이 유지됨을 육안으로 확인하였으며, 제타 포텐셜을 측정하여 시각적과 수치적으로 자성 나노유체의 분산안정성을 확인하였다. 제작된 자성 나노유체를 이용하여 관 내 대류열전달 특성에 따른 자기장 효과에 관하여 실험을 진행하였으며, 각 자성 나노유체에 관한 대류열전달 특성에 관한 대류열전달계수, Nu수 그리고 압력강하를 측정하였다. 또한 각 자성 나노유체별 최대 대류열전달 성능을 나타내는 농도의 자성 나노유체의 성능 특성을 비교 분석 하였으며, 이를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) Fe_3O_4 나노유체는 화학적 공침법 (chemical co-precipitation method)을 통하여 나노입자를 제조하였다. 0.2wt%의 농도에서 최대 대류열전달 특성이 나타났으며, 특히 Re 수가 1600에서 자기장 세기가 각각 0, 250, 500, 750 Gauss 일 때 대류열전달계수는 각각 1617, 1643, 1661, 1676 W/m^2K 가 나타났으며, 자기장 세기가 0 Gauss 대비 자기장 세기가 증가함에 따라 대류열전달계수는 각각 1.63%, 2.74%, 3.66% 향상됨을 확인하였다.

(2) $Fe_3O_4/MWCNT$ 하이브리드 나노유체는 기본유체에(water:EG=80:20) 1 대 1 비율로 Fe_3O_4 나노입자와 MWCNT 나노입자를 첨가하여 제조하였다. 분산안정성의 원인으로 0.1wt%에서 최대 대류열전달 계수가 나타났으며, Re 수 1600 일 때에서 자기장 세기가 각각 0, 250, 500, 750 Gauss 일 때 대류열전달계수는 각각 1647, 1668, 1688 W/m^2K 로 나타났으며, 자기장 세기가 0 Gauss 대비 자기장 세기가 증가함에 따라 대류열전달계수는 각각 1.28%, 1.83%, 2.55%씩 향상됨을 확인하였다.

(3) $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체는 Fe_3O_4 나노유체와 동일하게 화학적 공침법 (chemical co-precipitation method)을 통하여 나노입자를 제조하였으며, 0.2wt%의 농도에서 최대 대류열전달 특성이 나타났다. Re 수 1600 일 때 자기장 세기가 각각 0, 250, 500, 750 Gauss인 경우 대류열전달계수는 각각 1658, 1681, 1688, 1701 $\text{W/m}^2\text{K}$ 가 나타났으며, 자기장 세기가 0 Gauss 대비 자기장 세기가 증가함에 따라 대류열전달계수는 각각 1.41%, 1.83%, 2.63% 향상됨을 확인하였다.

그리고 최대 대류열전달계수가 나타난 농도의 자성 나노유체를 자기장 세기 변화에 따라 대류열전달계수와 압력강하를 비교 분석하였다. 최대 대류열전달계수를 비교하였을 때, Fe_3O_4 나노유체와 $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체는 0.2wt%에서 최대 대류열전달계수가 나타났으며, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체는 0.1wt%에서 최대 대류열전달계수가 나타났다. 자기장 세기 변화에 따라 대류열전달계수를 비교한 결과, 750 Gauss에서 0.2wt% $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 나노유체가 최대 대류열전달계수가 나타났으며 이를 통해 자기장 세기가 증가함에 따라 대류열전달계수가 증가하고 나노유체의 열전도도가 대류열전달계수에 직접적인 영향이 미치는 것을 확인할 수 있었다. 또한 자기장의 세기 변화에 따른 압력강하를 비교하였을 때 3 종류의 자성 나노유체 모두 0.2wt% 농도에서 최대 압력강하가 나타났으며, 대류열전달계수와 동일한 자기장 세기인 750 Gauss에서 0.2wt% $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MWCNT}$ 하이브리드 나노유체에서 3.60 kPa로 최대 압력강하가 나타났다. 외부 자기장의 영향이 없는 상태의 자성 나노유체의 압력강하는 외부 자기장의 영향이 받음에 따라 급격하게 증가하는 경향을 보이거나 자기장의 세기가 증가할수록 압력강하의 증가는 상대적으로 미미함을 확인하였다.

본 연구는 3 종류의 자성 나노유체를 적용하여 관 내 대류열전달 특성에 미치는 자기장 효과를 실험적으로 연구를 통하여 진행하였다. 이를 통해 관 내 강제 대류열전달 특성에 미치는 자기장 효과를 확인함으로써 자성 나노유체가 열 시스템의 작동유체로 사용 될 때 열시스템의 성능이 향상될 것으로 예측되며, 향후 나노유체를 적용한 열 시스템 설계 시 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

References

- [1] S. Choi, D.A. Siginer, H.P. Wang, Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles in Development and Applications of Non-Newtonian Flows, ASME, New York, 1995, pp. 99 - 105.
- [2] Y. T. Yang, F.H Lai, Numerical study of flow and heat transfer characteristics of alumina water nanofluids in a micro channel using the lattice Boltzmann method, International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011, pp. 607 - 614
- [3] Y. T. Yang, F. Lai, Numerical study of flow and heat transfer characteristics of alumina-water nanofluids in a microchannel using the lattice Boltzmann method, International Communications in Heat and Mass Transfer. 38, 2011, pp. 607 - 614
- [4] S. Zeinali Heris, M. Nasr Esfahany, and S. G. Etemad, Experimental investigation of convective heat transfer of Al_2O_3 /water nanofluid in circular tube, Int. J. Heat Fluid Flow 28, no. 2, 2007, pp. 203 - 210
- [5] Y. Hu, Z. Zhanga, H. Gaoa, Y. Hea, Forced convective heat transfer of solar salt-based Al_2O_3 nanofluids using lattice Boltzmann method, Thermal Science and Engineering Progress 8, 2018, pp. 2-9
- [6] D. K. Agarwal and S. S. Kumar, Experimental Investigation of Kerosene-Alumina nanofluid for heat transfer application, Proceedings of the 22nd National and 11th International ISHMT-ASME Heat and Mass Transfer

Conference, 2013

[7] W. Yu, D. M. France, E.V. Timofeev, D. Singh, J. L. Routbort, Comparative review of turbulent heat transfer of nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer 55, 2012, pp. 5380 - 5396

[8] W. Yu, E. V. Timofeev, D. Singh, D.M. France, R. K. Smith, Investigations of heat transfer of copper-in-Therminol 59 nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer 64, 2013, pp. 1196 - 1204

[9] S. M. Fotukian and M. Nasr Esfahany, Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube, Int. Commun. Heat Mass Transf., 37 no. 2, 2010, pp. 214 - 219

[10] B. Mehrjou, S. Zeinali Heris, and K. Mohamadifard, Experimental study of CuO/water nanofluid turbulent convective heat transfer in square cross-section duct, Exp. Heat Transf., 28 no. 3, 2015, pp. 282 - 297

[11] L. S. Sundar, M. T. Naik, V. S. Korada, M.K. Singh, T.Ch. S. Reddy, Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe₃O₄ magnetic nanofluid, Experimental Thermal and Fluid Science 37, 2012, pp.65 - 71

[12] L. Sha, Y. Ju, H. Zhang, and J. Wang, Experimental investigation on the convective heat transfer of Fe₃O₄/water nanofluids under constant magnetic field, Appl. Therm. Eng., 113, 2017, pp. 566 - 574

- [13] M. sheikholeslami, D. D. ganji, Influence of electric field on Fe_3O_4 -water nanofluid radiative and convective heat transfer in a permeable enclosure, *Journal of Molecular Liquids* 250, 2018, pp.404 - 412
- [14] V. Kumaresan, S. Mohaideen Abdul Khader, S. Karthikeyan, and R. Velraj, Convective heat transfer characteristics of CNT nanofluids in a tubular heat exchanger of various lengths for energy efficient cooling/heating system, *Int. J. Heat Mass Transf.* 60 no. 1, 2013, pp. 413 - 421
- [15] M. Gupta, R. Kumar, N. Arora, S. Kumar, and N. Dilbagi, Forced Convective Heat Transfer of MWCNT/Water Nanofluid Under Constant Heat Flux: An Experimental Investigation, *Arab. J. Sci. Eng.* 41 no. 2, 2016, pp. 599 - 609,
- [16] H. Ertürk, *International Journal of Heat and Mass Transfer Experimental characterization of laminar forced convection of hBN-water nanofluid in circular pipe*, 111, 2017 pp. 500 - 507
- [17] C. Qi, L. Yang & G. Wang, Numerical study on convective heat transfer enhancement in horizontal rectangle enclosures filled with Ag-Ga nanofluid, *Nanoscale Research Letters* 12, 2017
- [18] W. Duangthongsuk and S. Wongwises, Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO_2 -water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger, *Int. J. Heat Mass Transf.* 52 no. 7 - 8, 2009, pp. 2059 - 2067

- [19] A. R. Sajadi and M. H. Kazemi, Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid in circular tube, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 38, no. 10, 2011, pp. 1474 - 1478
- [20] S. S. Ashrafmansouri, M. N. Esfahany, G. Azimi, N. Etesami, Experimental investigation of water self-diffusion coefficient and tracer diffusion coefficient of tert-butanol in water-based silica nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences* 86, 2014, pp. 166-174,
- [21] V. Mikkola, S. Puupponen, K. Saari, T. Ala-Nissila, A. Seppala, Thermal properties and convective heat transfer of phase changing paraffin nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences* 117, 2017, pp. 163 - 171.
- [22] V. Mikkola, S. Puupponen, H. Granbohm, K. Saari, T. Ala-Nissila, A. Seppala, Influence of particle properties on convective heat transfer of nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences* 124, 2018, pp. 187-195
- [23] S. Saarinen, S. Puupponen, A. Meriläinen, A. Joneidi, A. Seppälä, K. Saari, T. Ala-Nissila, Turbulent heat transfer characteristics in a circular tube and thermal properties of n-decane-in-water nanoemulsion fluids and micelles-in-water fluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 81, 2015, pp. 246 - 251
- [24] M. Jarahnejad, E. B. Haghighi, M. Saleemi, N. Nikkam, R. Khodabandeh, B. Palm, M. S. Toprak & M, Experimental investigation on viscosity of water-based Al₂O₃ and TiO₂ nanofluids, *Rheol acta* 54, 2015, pp. 411 - 422.

- [25] S. Suresh, K. P. Venkitaraj, P. Selvakumar, and M. Chandrasekar, Effect of Al_2O_3 -Cu/water hybrid nanofluid in heat transfer, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 38, 2012, pp. 54 - 60
- [26] H. Yarmand et al., Convective heat transfer enhancement with graphene nano platelet/platinum hybrid nanofluid, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 88, 2017, pp. 120 - 125
- [27] N. Ahammed, L. G. Asirvatham, S. Wongwises, Entropy generation analysis of graphene - alumina hybrid nanofluid in multiport mini channel heat exchanger coupled with thermoelectric cooler, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 103, 2016, pp.1084 - 1097
- [28] A. A. Hussien, M. Z. Abdullah, N. Yusop, M. A. Al-nimr, and M. A. Atieh, International Journal of Heat and Mass Transfer Experiment on forced convective heat transfer enhancement using MWCNTs / GNPs hybrid nanofluid and mini-tube, *Int. J. Heat Mass Transf.* 115, 2017, pp. 1121 - 1131
- [29] Z. Han, B. Yang, S. Kim, M. Zachariah, Application of hybrid sphere/carbon nanotube particles in nanofluids, *Nanotechnology* 18 (10), 2007, pp. 105701.
- [30] E. Khosravifard, M. Salavati-Niasari, M. Dadkhah, Gh. Sodeifian, Synthesis and characterization of TiO_2 -CNTs nanocomposite and investigation of viscosity and thermal conductivity of a new nanofluid, *Journal of Nanostructures.* 2(2), 2012, pp.191 - 197.

- [31] L. Chen, W. Yu, H. Xie, Enhanced thermal conductivity of nanofluids containing Ag/MWNT composites, *Powder Technology*. 231, 2012, pp. 18 - 20.
- [32] M. Baghbanzadeh, A. Rashidi, A. H. Soleimansalim, D. Rashtchian, Investigating the rheological properties of nanofluids of water/hybrid nanostructure of spherical silica/MWCNT, *Thermochimica Acta* 578, 2014 pp. 53 - 58.
- [33] L. S. Sundar, G. O. Irurueta, M. K. Singh, A. Sousa, Heat transfer and friction factor of multi-walled carbon nanotubes - Fe_3O_4 nano composite nanofluids flow in a tube with/without longitudinal strip inserts, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 100, 2016, pp.691 - 703
- [34] D. Huang, Z. Wu, B. Sunden, Effects of hybrid nanofluid mixture in plate heat exchangers, *Experimental Thermal and Fluid Science* 72, 2016, pp. 190 - 196
- [35] 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, pp.108-116
- [36] L. Sha, Y. Ju, H. Zhang, J. Wang, Experimental investigation on the convective heat transfer of Fe_3O_4 /water nanofluids under constant magnetic field, *Applied Thermal Engineering* 113, 2017, pp.566 - 574
- [37] M. Amani, M. Ameri, A. Kasaeian, Investigating the convection heat

transfer of Fe_3O_4 nanofluid in a porous metal foam tube under constant magnetic field ,Experimental Thermal and Fluid Science 82, 2017, pp.439-449

[38] A. Bennis, N. Bouaziz, CFD modeling of turbulent forced convective heat transfer and friction factor in a tube for Fe_3O_4 magnetic nanofluid in the presence of a magnetic field, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 000 2017 pp.1-10

[39] M. sheikholeslami, M. B. Gerdroodbary, D. D. ganji, Numerical investigation of forced convective heat transfer of Fe_3O_4 -water nanofluid in presence of external magnetic source,Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 315, 2017, pp.831-845

[40] M. sheikholeslami, R. Ellahi, K. Vafai, Study of Fe_3O_4 -water nanofluid with convective heat transfer in the presence of magnetic source, Alex and ria Engineering Journal 157, 2018, pp.565-575

[41] E. Esmaceli, R. G. Chaydareh, S. A. Rounaghi, The influence of the alternating magnetic field on the convective heat transfer properties of Fe_3O_4 -containing nanofluids through the Neel and Brownian mechanisms, Applied Thermal Engineering 110, 2017, pp.1221-1219

[42] M. Bahiraei, M. Hangib, A. Rahbari, A two-phase simulation of convective heat transfer characteristics of water - Fe_3O_4 ferrofluid in a square channel under the effect of permanent magnet, Applied Thermal Engineering 147, 2019, pp.991 - 997

- [43] A. S. Dogonchi, Hashim, Heat transfer by natural convection of Fe_3O_4 -water nanofluid in an annulus between a wavy circular cylinder and a rhombus, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 130, 2019, pp.320 - 332
- [44] B. Sun, Y. Guo, D. Yang, H. Li, The effect of constant magnetic field on convective heat transfer of Fe_3O_4 /water magnetic nanofluid in horizontal circular tubes, *Applied Thermal Engineering* 171,2020, 114920
- [45] M. Mehralia, E. Sadeghinezhad, A. R. Akhiani, S. T. Latibari, H. S. C. Metselaar, A. Sh. Kherbeetd, M. Mehrali, Heat transfer and entropy generation analysis of hybrid graphene/ Fe_3O_4 ferro-nanofluid flow under the influence of a magnetic field, *Powder Technology* 308, 2017, pp.149-157
- [46] A. Shahsavar, M. Saghafian, M.R. Salimpour, M.B. Shafii, Experimental investigation on laminar forced convective heat transfer of ferrofluid loaded with carbon nanotubes under constant and alternating magnetic fields, *Experimental Thermal and Fluid Science* 76, 2016, pp. 1 - 11
- [47] J. Alsarraf, R. Rahmani, A. Shahsavar, M. Afrand, S. Wongwises & M. D. Tran, Effect of magnetic field on laminar forced convective heat transfer of MWCNT - Fe_3O_4 /water hybrid nanofluid in a heated tube, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 137, 2019, pp.1809-1825
- [48] L. Shi, Y. Hu, Y. He, Magnetocontrollable convective heat transfer of nanofluid through a straight tube, *Applied Thermal Engineering* 162, 2019, pp. 114220

- [49] H.E.Ghandoor, H. M. Zidan, M.M.H. Khalil, M. I. M. Ismail, Synthesis and Some Physical Properties of Magnetite (Fe_3O_4) Nanoparticles, International Journal of electrochemical science, 2012, pp. 5734-5745
- [50] D. Gao¹, M. Bai¹, C. Hu¹, J. Lv, C. Wang, X. Zhang, Investigating control of convective heat transfer and flow resistance of Fe_3O_4 /deionized water nanofluid in magnetic field in laminar flow, Nanotechnology 31, 2020, pp. 495-402
- [51] M. Goharkhah, A. Salarian, M. Ashjaee, M. Shahabadi, Convective heat transfer characteristics of magnetite nanofluid under the influence of constant and alternating magnetic field, Powder Technology 274, 2015, pp. 258 - 267
- [52] I. Nkurikiyimfura, Y. Wang, Z. Pan, Effect of chain-like magnetite nanoparticle aggregates on thermal conductivity of magnetic nanofluid in magnetic field, Experimental Thermal and Fluid Science 44, 2013, pp. 607 - 612
- [53] A. Ghofrani, M.H. Dibaei, A. Hakim Sima, M.B. Shafii, Experimental investigation on laminar forced convection heat transfer of ferrofluids under an alternating magnetic field, Experimental Thermal and Fluid Science 49, 2013, pp. 193 - 200
- [54] M. Ghasemian, Z.N. Ashrafi, M. Goharkhah, M. Ashjaee, Heat transfer characteristics of Fe_3O_4 ferrofluid flowing in a mini channel under constant and alternating magnetic fields, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 381, 2015, pp. 158 - 167

I. Nurdin, I. I. Yaacob, M. R. Johan, Enhancement of thermal conductivity and kinematic viscosity in magnetically controllable maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science* 77, 2016, pp. 265-271

[56] T. G. Beckwith, R. D. Marangoni, J. H. Lienhard, “Mechanical measurements”, 5th edition, Wesley Publishing Company, 1993.

[57] H. Bae, A Study on Convective Heat Transfer Characteristics of Alumina Oxide Nanofluids based on Water and Ethylene glycol mixture inner tube as a Function of Particle Shape, Engineering Master’s Thesis, 2011

[58] N. Zoljargal, Experimental study on the convective heat transfer characteristics of MWCNT/ Fe_3O_4 hybrid nanofluid, Engineering Master’s Thesis, 2020

[59] M. Lajvardi, J. Moghimi-Rad, I. Hadi, A. Gavili, T. D. Isfahani, F. Zabihi, J. Sabbaghzadeh, Experimental investigation for enhanced ferrofluid heat transfer under magnetic field effect, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 322, 2010, pp. 3508-3513

[60] A.A. Abbasian Arani, J. Amani, Experimental study on the effect of TiO_2 - water nanofluid on heat transfer and pressure drop, *Experimental Thermal and Fluid Science* 42, 2012, pp. 107 - 115