ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 23(2), 77-81 (2013) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2013.23.2.077

회전수 및 자기장강도 변화에 따른 이중원관내 자성유체의 자연대류 열전달 특성에 관한 실험적 연구

김형진 · 서재형 · 김대완
동아대학교 기계공학과 대학원, 부산시 사하구 하단동 840, 604-714

이무연* · 서이수
동아대학교 기계공학과, 부산시 사하구 하단동 840, 604-714

(2013년 1월 28일 받음, 2013년 4월 8일 최종수정본 받음, 2013년 4월 8일 게재확정)

본 연구의 목적은 회전자기장에서 회전수 및 자기장강도 변화에 따른 이중원관내 자성유체의 자연대류 열전달 특성에 관하여 고찰하는 것이다. 회전자기장은 6극 3상 유도전동기를 사용하여 인가하였고, 인버터 드라이버와 전압변환기를 이용하여 회전수 및 자기장강도를 제어하였다. 실험에 사용된 경계조건으로 이중원관 내부원관은 30 ºC로 유지하고 외부원관은 25 ºC로 유지하였으며, 회전자기장은 반시계방향으로만 인가하여 실험을 수행하였다. 그 결과 이중원관내 자성유체의 자연대류 열전달 특성은 회전자기장의 회전수 및 자기장강도 증가에 따라 열확산이 증가하여 고온부과 저온부의 열교환이 활발히 이루어졌으며, 이중원관내 자성유체의 열확산 방향은 인가자기장과 같은 방향인 반시계방향으로 진행되었다.

주제어 : 회전자기장, 이중원관, 자기장강도, 자성유체, 자연대류

I. 서 론

과학 및 공학 기술의 발전과 함께 특별한 목적을 수행하기 위한 기능성 재료 및 유체에 대하여 관심이 증가하였고, 이러한 신소재의 하나로 자기장에 강한 반응을 하는 자성유체가 개발되어 그 특성을 이용한 연구들이 다방면으로 진행되고 있다. 일반적인 자성유체의 작동원리는 다음과 같다. 첫째로는 인가자기장에 의한 자성유체의 물성을 변화시키는 것이 있으며 둘째로는 자성유체에 임의의 물체를 부양상태로 유지시키는 것이 있고 셋째로는 자성유체의 유동을 자기장에 의하여 제어하는 것 등들이 있다[1]. 이러한 연구 분야 중에서 인가자기장에 따른 자성유체의 자연대류 열유동 특성에 관한 연구는 열관리 분야와 관련되어 공학적인 중요성 때문에 최근까지 다양한 연구가 진행되고 있다. Park은 이중원관내 자성유체의 외부자기장에 대한 자연대류의 실험적 연구를 하였다. Choe et al.은 회전자기장의 변화를 이용한 각도 검출에 관한 연구를 수행하였고, Handa는 회전자기장에서 자성유체의 선회류에 관한 연구를 수행하였다[2-4]. 이러한 연구들은 고정자기장 및 회전자기장에 따른 자성유체의 열전달 특성에 관한 기초적인 연구로, 회전수의 변화 및 인가자기장의 강도 변화에 따른 보다 심화된 연구는 이루어지지 않았다. 더불어, 이중원관내 자성유체의 자연대류현상에 관한 심도 있는 연구가 필요하다.

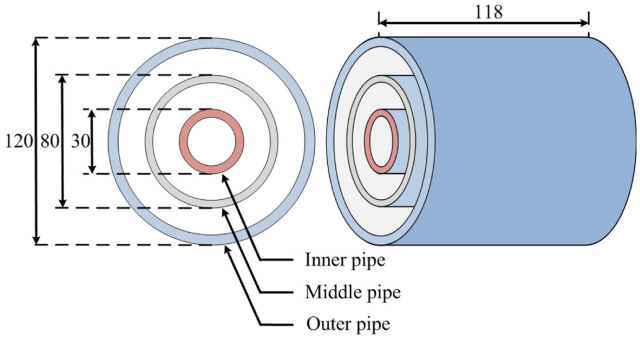
따라서 본 연구에서는 회전수 및 자기장강도 변화에 따른 이중원관내 자성유체의 자연대류 열전달 특성에 관하여 가시화 기법을 이용하여 실험적으로 고찰하였다.

II. 본 론

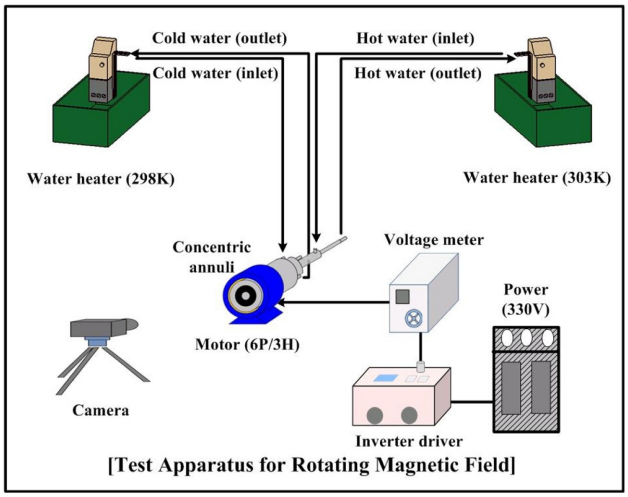
1. 실험장치 및 방법

회전수 및 자기장강도 변화에 따른 이중원관내 자성유체의 자연대류 열전달 특성을 실험적으로 고찰하기 위하여, Fig. 1과 같은 실험장치를 제작하였다. Fig. 1(a)는 본 연구에서 사용한 이중원관의 형상이며, 내관(Inner pipe)은 구리(Copper) 재질이며, 중관(Middle pipe) 및 외관(Outer pipe)은 스틸(Stainless steel)로 제작되었고, 구체적인 사양은 Table I에 나타내었다. Fig. 1(b)는 본 연구에서 제작한 실험장치이며, 구체적인 사양 및 실험시 사용된 온도조건은 Table II와 같다. 이중원관내 저온(25 ºC) 및 고온(30 ºC) 유체의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 침수전열기(Water heater) 2개를 사용하였고, 감온액정시트(Temperature liquid crystal sheet)을 이용하여 이중원관내에서 발생하는 열전달 현상을 가시화하였다. 감온액정시트의 측정온도범위는 25 ºC에서 30 ºC이고 감

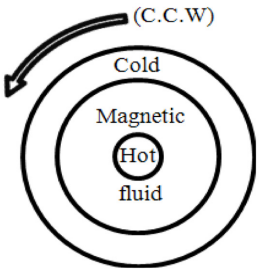
© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author:
Tel: +82-51-200-7672, e-mail: mylee@dau.ac.kr



(a) Configuration of the tested concentric annuli (unit : mm)



(b) Test set-up



(c) Directions of the magnetic field

Fig. 1. (Color online) Schematic diagram of test set-up.

Table I. Specifications of tested concentric annuli.

Components		Specifications
Outer pipe (mm)		120
Middle pipe (mm)		80
Inner pipe (mm)		30
pipes thickness (mm)		0.5
Horizontal length (mm)		118
Material	(Inner pipe)	Copper
	(Outer pipe, Middle pipe)	Stainless steel

온액정시트는 고온일 때 파랑색으로 나타내고 저온일 때 붉은색으로 나타난다[5]. 본 연구에서 외기온도는 감온액정시트에 영향을 주지 않도록 20 °C로 유지하였다.

Table II. Specifications of test set-up.

Components	Specifications
Water heater (kW)	1
Size of water tank (mm^3)	225 × 400 × 180
Resolution of the measuring camera (mm)	18~55
Amount of magnetic fluid (g)	800
Size of temperature liquid crystal sheet (mm^2)	100 × 100
Inverter driver power (kW)	5.5
Voltage meter power (kW)	6
Temperature of atmosphere (°C)	20
Temperature of cold water (°C)	25
Temperature of hot water (°C)	30

Table III. Specifications of the tested motor.

Components	Specifications
Number of pole	6
Number of phase	3
Rated voltage (V)	380
Rated frequency (Hz)	60.0
Rated current (A)	9.6
Number of revolutions (rpm)	1165
Efficiency (%)	87.5

Table IV. Properties of ferrofluid W-40 (20 °C).

Properties	W-40
Density, ρ (kg/m^3)	1.37×10^3
Viscosity, η (Pa · s)	1.06×10^{-2}
Dynamic viscosity, ν (m^2/s)	7.78×10^{-6}
Specific heat, C_p (kJ/kg K)	3.032
Thermal conductivity, κ (W/mK)	4.343

이중원관내에 회전자기장을 만들어 주기 위하여 6극 3상 유도전동기를 사용하여 회전자(Rotor)를 제거하고 고정자(Stator)만을 사용하여 380 V의 전압을 인가하였다. 본 연구에서 사용한 6극 3상 유도전동기의 상세사양은 Table III에 나타내었다. 본 연구에서 회전자기장은 반시계방향(Counterclockwise, CCW)으로 회전하도록 제어하였고, 최대 주파수 75 Hz의 인버터 드라이버(MITSUBISHI FREQROL Co., E500)를 이용하여 주파수(Frequency)를 일정하게 제어하였다. 자기장강도는 회전수 변화에 따라 민감하게 반응하기 때문에 전압변환기(Voltage meter)를 이용하여 실험조건에 따라 자기장을 일정하게 변화시켰다.

본 연구에서 사용된 자성유체는 일반적으로 많이 사용되고 있는 물 베이스의 W-40(Ferrofluid)을 이용하였다. 본 연구에서 사용한 자성유체의 물성치는 Table IV에 나타내었다. 이중원관내 자성유체의 자연대류 열전달 특성을 고찰하기 위하여 감온액정시트를 이용하여 열의 흐름을 시각적으로 고찰하였으며, 고정밀 측정카메라를 이용하여 2분 간격으로 총 8분

동안 촬영하였다. 또한 6극 3상 유도전동기에서 발생되는 자기장이 측정 카메라에 영향을 주지 않게 하기 위하여 카메라와 실험 장치는 1 m의 거리를 유지하였다.

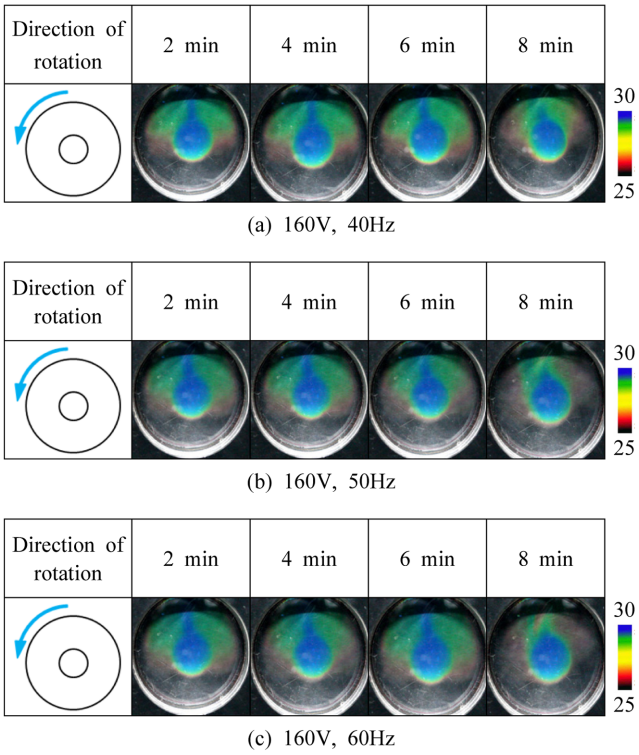
III. 결과 및 고찰

1. 회전자기장 및 고정자기장의 특징

이중원관내의 자성유체에 고정자기장을 인가하였을 경우 자기장의 방향에 따라 열유동 특성이 변화한다[6]. 왜냐하면, 인가자기장의 방향과 중력 방향에 따라 고정자기장에 의하여 발생되는 자기체적력이 일종의 부력으로 작용하여 온도 차이에 따른 밀도차를 증가시키거나 감소시키는 역할을 하여 자성유체의 자연대류, 등온선도 및 열유동 특성은 인가자기장의 방향에 따라 제어 또는 억제가 되는 것이다. 그러나 이중원관내의 자성유체에 회전자기장을 인가하였을 경우 자성유체의 열전달 특성은 고정자기장에서의 인가방향과는 다르게 회전수 및 자기장강도에 따라 등온선도 특성을 원하는 방향으로 제어할 수 있게 된다.

2. 회전수 변화에 따른 특성

Fig. 2는 전압 160 V에서의 자기장의 세기 및 반시계 방향으로 자기장을 인가한 경우에 회전수를 40 Hz에서 60 Hz로 증가하였을 경우의 이중원관내 자성유체의 열전달 특성을 가시화 기법을 이용하여 나타낸 그래프이다. 먼저, 이중원관내 자성유체는 회전수 변화와 상관없이 반시계 방향으로 열확산이 진행됨을 알 수 있다. 이러한 이유는 이중원관내 회전자기장을 반시계 방향으로 인가하여 자성유체가 영향을 받았기 때문이다. Fig. 2(a)는 회전수 40 Hz에서 실험결과로 시간경과에 따른 이중원관내 고온 플럼의 위치가 좌측으로 회전하는 것을 알 수 있으며, 고온 플럼은 6분까지 반시계 방향으로 일정하게 열확산이 이루어지고 있으나 6분을 경과하면서부터는 고온 플럼의 위치가 더욱 좌측으로 기울어지면서 고온 플럼 주변의 온도변화가 붉은색 계통으로 변화하는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 측정시간이 증가함에 따라 고온에서 저온으로 열전달(열확산)의 증가와 함께 회전자기장에 의한 자성유체의 영향력이 증가하였기 때문이다[7]. 또한, Figs. 2(a), (b) and (c)의 고온 플럼 주변의 색변화를 시간경과 8분에서 관찰하면, 회전수가 40 Hz에서 60 Hz로 증가할수록 플럼 주변의 고온영역이 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 고온 플럼 주변의 저온유체로의 열확산이 증가하여 고온 플럼과 주변과의 열교환이 증가하였기 때문이다. 따라서 회전자기장에서 회전수의 증가는 이중원관내 자성유

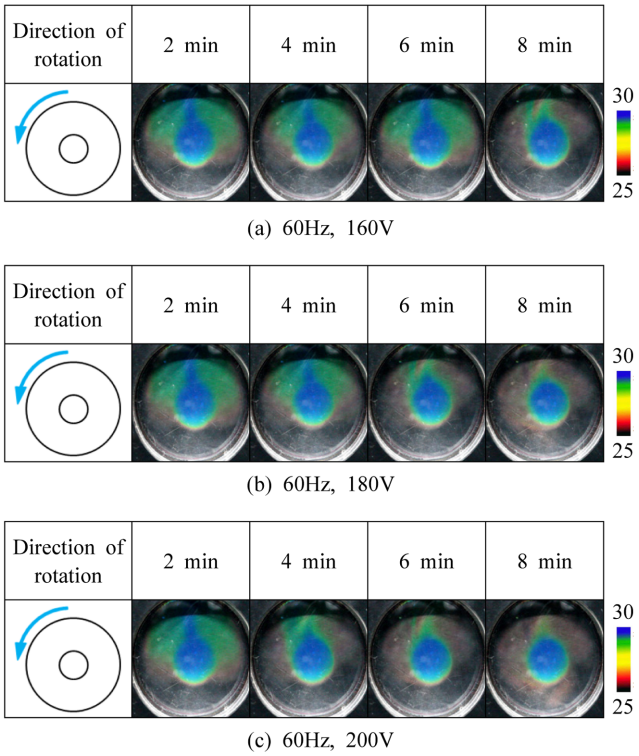


(a) 160V, 40Hz

(b) 160V, 50Hz

(c) 160V, 60Hz

Fig. 2. (Color online) Temperature profile with the variations of number of revolutions using visualization technique (Magnetic field strength in 160 V).



(a) 60Hz, 160V

(b) 60Hz, 180V

(c) 60Hz, 200V

Fig. 3. (Color online) Temperature profile with the variations of magnetic field strength using visualization technique (Frequency = 60 Hz).

체의 열확산을 촉진시킴을 알 수 있다.

3. 자기장강도 변화에 따른 특성

Fig. 3은 회전수 60 Hz 및 반시계 방향으로 자기장을 인가한 경우에 전압 160 V로 200 V의 자기장 세기를 증가하였을 경우 이중원관내 자성유체의 열전달 특성을가시화 기법을 이용하여 나타낸 그래프이다. 모든 자기장강도에서 측정시간이 경과함에 따라 고온 플럼 주변으로 열확산은 증가하는 것을 알 수 있으며, 전압이 160 V에서 200 V로 자기장 세기를 증가함에 따라 이러한 경향은 더욱 증가함을 알 수 있다. 또한, 측정시간 8분을 기준으로 이중원관내 고온 플럼 주변의 색상은 전압 160 V의 자기장 세기에서 검정색 계통을 띄는 반면 전압 200 V의 자기장 세기에서는 연한 붉은색 계통을 띄는 것을 알 수 있었다. 이러한 이유는 전압 200 V의 자기장 세기에서 전압 160 V의 자기장 세기의 경우보다 고온 플럼의 주변온도가 더 높다는 것을 나타낸다. 따라서 회전자기장에서 자기장강도의 증가는 이중원관내 자성유체의 열확산을 촉진시킴을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 회전자기장에서 회전수 및 자기장강도 변화에 따른 이중원관내 자성유체의 자연대류 열전달 특성을 가시화 기법을 이용하여 실험적으로 고찰하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 회전자기장에서 자성유체의 자연대류 열전달 특성은 회전수 및 자기장강도에 따라 제어할 수 있다.

2. 이중원관내 자성유체는 회전수 및 자기장강도 변화와 상관없이 회전자기장의 방향인 반시계 방향으로 열확산이 진행되었다.

3. 회전자기장에서 이중원관내 자성유체의 열확산은 회전수 및 자기장강도 증가와 함께 증가하였다.

감사의 글

본 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

[1] H. S. Lee and J. G. Yoo, J. Kor. Mag. Soc. **8**, 93 (1998).
[2] J. W. Park, A Study on the Heat Transfer Characteristics and Fluid Flow of Magnetic Fluids in Concentric Double Pipe Annuli, Ph. D. Thesis, Dong-A Univ., Korea (2002).
[3] H. H. Choe, J. B. Ann, G. H. Choe, and G. S. Lee, Proc. of the KIEE Fall Conf. **1**, 182 (1987).
[4] T. Handa, 回磁場下における磁性流の旋回流にする究, Master Thesis, Keio Univ., Japan (1998).
[5] H. J. Kim, J. H. Seo, D. W. Kim, M. Y. Lee, and L. S. Seo, J. Kor. Mag. Soc. **23**, 26 (2013).
[6] J. W. Park, J. H. Lee, and L. S. Seo, J. Kor. Mag. Soc. **11**, 245 (2001).
[7] Y. Matsubara, Natural and Magnetic Convections of a Magnetic Fluid in Concentric Annuli under Rotating Magnetic Field, Master Thesis, Keio Univ., Japan (1994).

Experimental Study on the Natural Convective Heat Transfer Characteristics of Ferrofluid for Concentric Annuli under Rotating Magnetic Field

Hyung-Jin Kim, Jae-Hyeong Seo, and Dae-Wan Kim
Graduate School of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

Moo-Yeon Lee* and Lee-Soo Seo
Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

(Received 28 January 2013, Received in final form 8 April 2013, Accepted 8 April 2013)

The objective of this study is experimentally to investigate natural convective heat transfer characteristics of the ferrofluid for a concentric annuli under rotating magnetic field with variations of the revolution and the magnetic field strength. The rotating magnetic field was provided by induction motor with 6 poles and 3 phases and the revolution and the magnetic field strength were controlled by an inverter driver and a voltage meter, respectively. Temperatures of the inner pipe and the outer pipe in the tested concentric annuli were maintained at 30 °C and 25 °C, respectively, during the test and the direction of the rotating magnetic field was a counterclockwise. As a result, the natural convective heat transfer characteristics of the ferrofluid for a concentric annuli were increased with the rise of the revolution and magnetic field strength due to the increased heat dissipation between hot side and cold side of the concentric annuli.

Keywords : rotating magnetic field, concentric annuli, magnetic field strength, ferrofluid, natural convection