ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 23(1), 26-30 (2013) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2013.23.1.026

가시화기법을 이용한 고정자장에서 이중원관내 자성유체의 열유동 특성에 관한 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 2일 받음, 2012년 1월 21일 최종수정본 받음, 2013년 1월 22일 게재확정)

본 연구의 목적은 고정자장에서 이중원관내 인가자장의 방향 변화에 따른 자성유체의 열유동 특성에 관하여 실험적으로 연구하는 것이다. 이를 위하여 이중원관 내부원관은 30 ºC로 유지하고 외부원관은 25 ºC로 유지하였으며, 자성유체가 담겨져 있는 중앙관에 고정자장을 상하 좌우의 4방향으로 인가하였다. 인가자장은 영구자석 4개를 이용하여 이중원관 전체로 균일하게 인가하였고, 이중원관내 자성유체는 인가자장의 방향에 따라 열유동 특성이 변화였다. 결과적으로 인가자장을 상측면에서 인가하였을 경우 중력의 영향이 감소하는 방향으로 열확산이 이루어졌으며, 반대로 인가자장을 하측면에서 인가하였을 경우 외견상 중력에 자기 체적력이 추가되어 열확산이 촉진됨을 알 수 있다.

주제어 : 고정자장, 가시화, 이중원관, 열유동, 자성유체

I. 서 론

자성유체는 금속의 강자성과 유체의 유동성을 겸비한 고액 혼상유체로 외견상 액상 자체가 자성을 가지도록 인공적으로 만들어졌으며, 자성유체는 1900년에 Benard가 유체의 열적 특성에 관한 연구를 시작하면서 학문적으로 관심을 받게 되었다. 1960년대 NASA의 Papell이 무중력 하에서 로케트의 액체연료를 운반할 목적으로 제조한 것이 시초가 되었으며, 이후 자성유체는 자기력에 반응하는 특수유체의 성질과 나노크기의 미립자를 이용하는 나노유체의 성질을 모두 가지고 있기 때문에 기계공학의 다양한 분야에서 응용이 기대되었을 뿐만 아니라 열과 유동을 제어해야 하는 열-유체분야에서도 다양한 연구가 진행되었다[1]. Kim 등은 자성유체의 열전달 현상에 관한 기초연구로 회전자를 갖는 분리형 히트파이프의 열전달 특성에 관하여 연구 하였고, Kim 등은 자성유체의 Benard 유동에서의 열전달 특성에 관한 연구를 진행하였다[2, 3]. Park 등은 장방형 용기내 자성유체의 Benard 유동에 대하여 열 제어 특성에 관하여 연구하였으며, Kim 등은 회전체를 이용한 자성유체 유동특성에 대하여 해석적으로 연구하였다[4, 5]. 이러한 연구들은 일반적으로 많이 사용되고 있는 뉴턴유체와 다른 자성유체의 인가자장에 따른 열전달 및 열제어 특성에 관한 기초적인 연구에 국한되었으며, 인가자장의 방향 변화에 따른 자성유체의 열전달 특성과 자연대류현상에 관한 심도 있는 연구는 미비한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 이중원관에서 외부자장의 방향 변화에 따른 자성유체의 열-유동 특성을 실험적으로 고찰하였다. 또한, 자성유체의 열유동 특성을 고찰하기 위하여 이중원관 외부에 자장을 인가하였을 때 이중원관 내부에서 발생되는 열전달 현상을 가시화 기법을 이용하여 고찰하였다.

II. 본 론

1. 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 제작한 실험 장치이며, 각 장치들의 구체적인 사양을 Table I에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 이중원관 형상은 Fig. 2에 나타내었다. 내부원관 직경은 30 mm이고 외부원관 직경은 120 mm이며 자성유체가 채워져 있는 중앙관 직경은 80 mm이다. 모든 관의 두께는 0.5 mm이고 이중원관의 사양은 Table II에 나타내었다. 이중원관의 내부원관과 외부원관을 순환하는 고온유체와 저온유체의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 침수전열기 2개를 사용하였고, 감온액정시트(Temperature liquid crystal sheet)을 이용하여 이중원관 내에서 발생하는 열유동 현상을 가시화하였다. 감온액정시트의

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author:
Tel: +82-51-200-7642, e-mail: mylee@dau.ac.kr

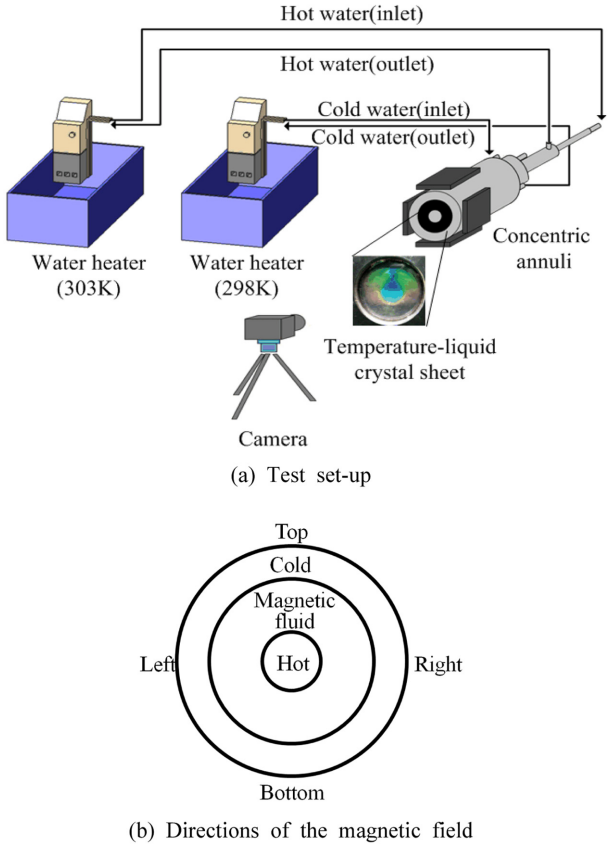


Fig. 1. (Color online) Schematic diagram of the test set-up.

Table I. 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
Size of permanent magnet (mm^3)	80 × 80 × 10
Intensity of permanent magnet (mT)	148
Amount of magnetic fluid (g)	800
Size of temperature liquid crystal sheet (mm^2)	100 × 100

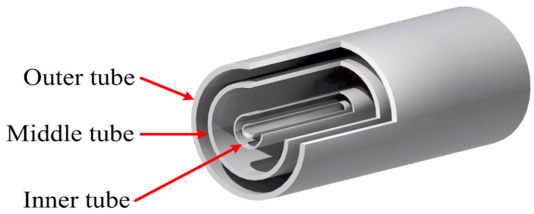


Fig. 2. (Color online) Configuration of the tested concentric annuli.

측정온도범위는 25 °C에서 30 °C이고 감온액정시트는 고온일 때 파랑색으로 나타내고 저온일 때 붉은색으로 나타난다. 본 연구에서는 외기온도가 감온액정시트에 영향을 주지 않도록 20 °C로 유지하고 이중원관 내부원관의 고온유체는 30 °C로 유지하였으며, 외부원관의 저온유체는 25 °C로 유지하였다. 실험에 사용된 자성유체는 물 베이스의 W-40을 이용하였고, 중앙관에 자성유체 800 g을 봉입하였다. 본 연구에서 사용한 실험조건 및 자성유체의 물성치는 Tables III과 IV에 나타내었다.

Table II. Specifications of concentric annuli.

Components		Specifications
Outer tube diameter (D1, mm)		120
Middle tube diameter (D2, mm)		80
Inner tube diameter (D3, mm)		30
Thickness (mm)		0.5
Horizontal length (mm)		80
Material	(Inner tube)	Copper
	(Outer tube, Middle tube)	Stainless steel

Table III. Test conditions.

Components	Temperature (°C)
Ambient	20
Cold water	25
Hot water	30

Table IV. Properties of ferricolloid 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

2. 실험방법

본 연구에서는 2개의 침수전열기를 이용하여 이중원관의 내부 및 외부관의 작동유체의 온도를 일정하게 유지하였고, 평균 37 mT의 영구자석 4개를 이용하여 총 148 mT의 자장을 이중원관 외부에서 상하좌우의 4 방향으로 인가하였다. 자장 변화에 따른 자성유체의 열유동 특성은 감온액정시트를 이용하여 시각적으로 측정하였으며, 고정밀 측정 카메라를 이용하여 2분 간격으로 총 8분 동안 촬영 및 저장하였다. 촬영시간이 8분 이상이 되면 감옥액정시트의 온도 변화가 더 이상 발생하지 않기 때문에 이 시간에서 자성유체의 열확산은 정상상태가 되었다고 가정하였다. 또한 측정 카메라가 자장의 영향을 받지 않도록 실험 장치로부터 1 m 이상 거리를 유지하면서 실험을 진행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 자성유체의 특성

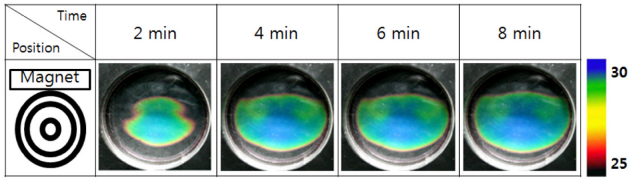
자성유체는 자장을 인가하지 않을 경우 뉴턴유체와 유사한

거동특성을 보인다. 이러한 이유는 자성유체에 자장이 인가되었을 때 인가자장에 따른 자기체적력의 영향으로 자연대류 및 등온선도 특성이 영향을 받기 때문이다. 즉 인가자장의 방향과 중력 방향에 따라 고정자장에 의하여 발생되는 자기체적력이 일종의 부력으로 작용하여 온도 차이에 따른 밀도차를 증가시키거나 감소시키는 역할을 하기 때문이다. 이러한 특성으로 인하여 자성유체의 자연대류 및 열유동 특성은 인가자장의 방향에 따라 제어될 수 있다[6, 7].

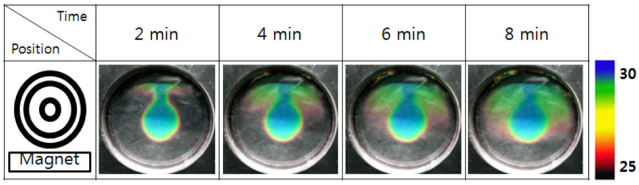
2. 자장인가 방향에 따른 결과

Fig. 3은 이중원관의 수직방향인 상측면과 하측면에 자장을 인가하였을 경우의 자성유체의 거동을 나타낸다. 두 실험 결과에서 알 수 있듯이 인가자장의 방향과 열확산 진행 방향은 반대로 진행된다는 것을 알 수 있다. Fig. 3(a)에서 보는 것처럼, 인가자장을 중력의 반대방향인 상측면에서 인가하였을 경우 뉴턴유체의 자연대류에서 중력의 영향이 감소하는 방향으로 열확산이 이루어지는 것을 알 수 있다. 이와 반대로 인가자장을 중력과 동일한 방향인 하측면에서 인가하였을 경우 Fig. 3(b)에서 보는 것처럼 외견상 중력에 자기 체적력이 추가되어 열확산이 촉진됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 이중원관의 수평방향인 좌측면과 우측면에 자장을 인가하였을 경우의 자성유체의 거동을 나타낸다. 인가자장을 수직방향에서 인가하였을 경우와 유사한 특성을 나타내며, 수평방향으로 자장을 인가하였을 경우에도 인가된 자장의 방향과 반대방향으로 자성유체의 열확산은 진행됨을 알 수 있다. Fig. 4(a)에서 보는 것처럼, 자장을 우측면에서 인가하였을 경우 시간이 경과함에 따라 자성유체의 열확산은 좌측방향으로 진행되었고, Fig. 4(b)에서 보는 것처럼 자장을 좌측면에서 인가하였을 경우 시간이 경과함에 따라 열확산은 우측으로 진행됨을 알 수 있었다. 즉 자장이 수평방향으로 인가하게 되면 수직방향으로 발생하는 부력(Buoyancy force)보다 인가자장에 비례하여 발생하는 자기 체적력의 좌측면과 우측면의 속도 성분이 더 크게 증가 되어 자성유체의 열확산 방향이 변화는 것을 알 수 있다. 결과적으로 수평방향으로 자장을 인가하였을 경우 이중원관내의 자성유체의 자연대류 현상이 인가자장의 방향과 반대로 발달됨을 알 수 있다.

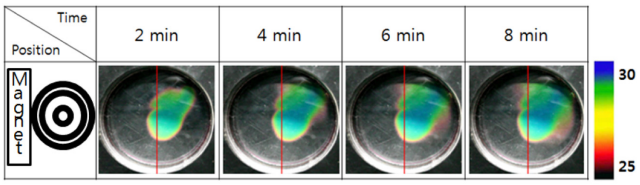


(a) Top

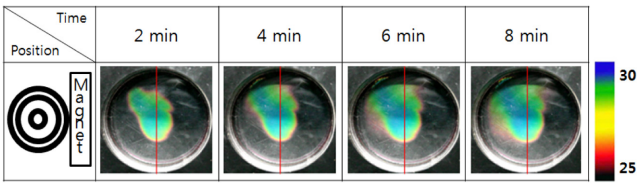


(b) Bottom

Fig. 3. (Color online) Experimental results using magnetic fluid (Perpendicular magnetic field).



(a) Left

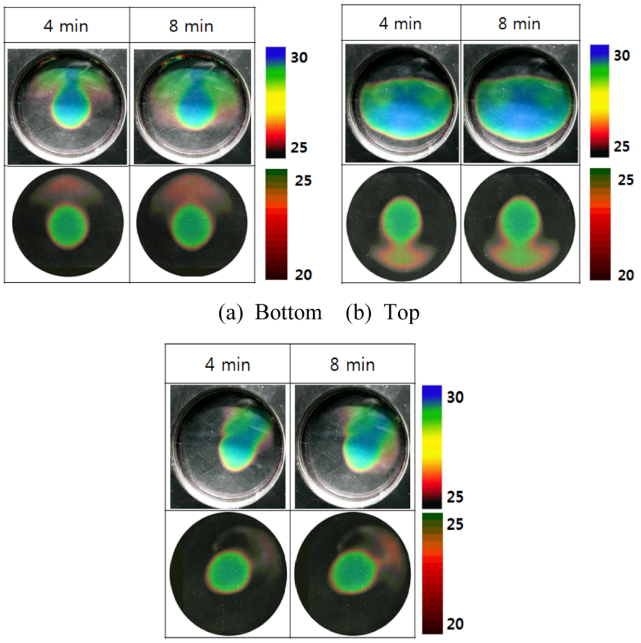


(b) Right

Fig. 4. (Color online) Experimental results using magnetic fluid (Horizontal magnetic field).

3. 관 크기에 따른 자성유체의 특성

Fig. 5에서는 이중원관의 내부 직경 변화에 따른 자성유체의 열유동 특성을 알아보기 위하여 Park의 연구결과와 비교하였다[8]. Park은 본 연구에서 사용한 이중원관과 동일한 형상을 사용하고 있으나 내부관 직경은 10 mm이고 외부관 직경은 50 mm로 본 연구에서 사용한 이중원관에 비하여 내부원관 직경은 3배 작고, 외부원관 직경은 2.4배 작다. 또한 이중원관내 자성유체의 실험 온도 범위는 20~25 °C로 본 연구의 온도 범위보다 5 °C가 낮고 상하좌우 방향에서 평균 90 mT의 자장을 인가하여 본 연구에서 사용한 자장강도에 비하여 58 mT가 작다. Fig. 5(a)는 이중원관의 하측면에서 자장을 인가하였을 경우 자성유체의 열유동 특성을 비교한 결과이다. 내부원관의 고온영역에서 열이 발달되어 자장의 반대방향(위쪽)으로 열확산이 되는 것은 Park의 실험결과에서도 동일하게 확인되었다. 그러나 본 연구에서는 내부원관에서 발달되어 올라오는 고온플럼과 열확산 진행과정을 뚜렷하게 확인할 수 있으나, Park의 결과에서는 고온플럼이 명확하게 확인되지 않았고 열확산 속도가 상대적으로 느리게 진행되었다. Fig. 5(b)는 이중원관의 상측면에서 인가하였을 경우의 자성유체의 열유동 특성을 비교한 결과이다. Park의 결과에서는 고온 플럼이 아래로 천천히 확산되는 반면 본 연구에서는 고온 플럼이



(a) Bottom (b) Top

(c) Left

Fig. 5. (Color online) Comparisons with the existed research results (Park, 2002).

빠르게 확산되었고 상대적으로 넓게 확산되는 것을 확인할 수 있었다. Park의 연구에서는 고온 플럼이 하강하여 좌우 확산이 본 연구결과와 비교하여 상대적으로 느리게 이루어진 이유는 이중원관의 관경이 감소함에 따라 인가자장의 영향이 상대적으로 증가하여 열확산에 영향을 미쳤기 때문이다. Fig. 5(c)는 이중원관에 수평방향으로 자장을 인가하였을 경우 자성유체의 열유동 특성을 비교한 결과이다. 수평방향으로 자장을 인가하였을 경우 자성유체의 열유동 방향이 자장 인가방향과 반대로 확산되는 것을 알 수 있었다. Park의 실험결과에서는 내부에서 발달된 고온 플럼이 본 연구결과에 비하여 뚜렷하게 나타나지 않았으나 플럼의 기울기는 더 크게 나타났다. 이러한 이유는 Park이 사용한 이중원관은 본 연구에서 사용된 이중원관보다 관경이 작은 것을 사용하여 인가 자장의 영향이 이중원관의 끝까지 영향을 미쳤기 때문에 기울기가 더 크게 나타났다. 이상의 연구결과를 바탕으로 이중원관의 직경변화는 자성유체의 열유동 특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있었고, 관 직경이 감소할수록 인가자장의 영향을 더 크게 받음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 고정자장에서 이중원관내 인가자장의 방향 변화에 따른 자성유체의 열유동 특성에 관하여 실험적으로 고찰하였고, 기존 연구자들의 실험결과와 비교하여 관 크기 변화에 따른 인가자장의 영향을 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 이중원관내 자성유체의 열전달 특성은 인가자장의 방향에 따라 변화였고, 관찰 시작 후 8분이 경과하면서 열전달 흐름은 정상상태가 되었다.

2. 이중원관의 내부원관을 고온으로 유지하고 하측면에서 자장을 인가하였을 경우, 자성유체의 열유동 현상은 자장을 인가하지 않았을 경우보다 촉진되었고, 윗방향으로 자장을 인가하였을 경우 자성유체의 열유동 현상은 억제되었다.

3. 이중원관의 직경변화는 자성유체의 열유동 특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있고, 관 직경이 감소할수록 인가자장의 영향을 더 크게 받음을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

[1] S. S. Papell, Magnetic Fluid Readily Controlled in Zero Gravity Environment, NASA, LEW-126 (1965).
[2] O. G. Kim and C. H. Jun, Solar Energy **20**, 75 (2000).
[3] J. W. Park, S. H. Jin, C. H. Jun, L. S. Seo, and Y. S. Kim, J. Kor. Mag. Soc. **13**, 41 (2003).
[4] J. G. Ahn, L. S. Seo, and G. M. Park, J. Flu. Mac. **7**, 32 (2004).
[5] D. G. Lee, S. R. Kim, K. N Ha, and S. G. Kim, Proc. of the KSPE Spring Annual Meeting (2012) pp. 1063~1064.
[6] J. H. Seo, A Numerical Study on the Natural Converction of Magnetic Flud in a Cubic Cavity, Master Thesis, Dong-A Univ., Korea (2010).
[7] S. W. Hwang, J. W. Park, and L. S. Seo, J. Kor. Mag. Soc. **17**, 253 (2007).
[8] 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).

Thermal-flow Characteristics of Magnetic Fluid for Concentric Annuli Under Fixing Magnetic Field Using Visualization Technique

Hyung-Jin Kim, Jae-Hyeong Seo, and Dae-Wan Kim
Graduate School of Mechanical Engineering, Dong-A University, Hadan 840, Saha-gu, Busan 604-714, Korea

Moo-Yeon Lee* and Lee-Soo Seo
Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, Hadan 840, Saha-gu, Busan 604-714, Korea

(Received 2 January 2013, Received in final form 21 January 2013, Accepted 22 January 2013)

This article is experimentally to investigate thermal-flow characteristics of the magnetic fluid for concentric annuli under externally fixed magnetic fields using visualization technique. Temperatures of the inner tube and outer tube in the tested concentric annuli were constantly maintained at both 30 °C and 25 °C and the middle tube was filled with the magnetic fluid. Magnetic field was uniformly applied using 4 permanent magnets at 4 directions of the concentric annuli. As a result, the thermal-flow characteristics of the magnetic fluid for concentric annuli could be controlled by directions of the external magnetic fields.

Keywords : fixed magnetic field, visualization technique, concentric annuli, thermal-flow, magnetic fluid