

정방형관 내에서 자성유체의 자연대류현상에 대한 수치적 연구

서재형* · 이무연* · 서이수**

* 동아대학교 기계공학과

Study of Natural Convection of Magnetic Fluid in Cubic Cavity

Jae-Hyeong Seo*, Moo-Yeon Lee* and Lee-Soo Seo**

* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

(Received November 22, 2012 ; Revised April 24, 2013 ; Accepted April 26, 2013)

Key Words: Magnetic Fluid(자성유체), Magnetic Field(자장), Natural Convection(자연대류), Nusselt Number(Nusselt 수)

초록: 본 연구에서는 밀폐된 정방형관 내에서 자성유체의 자연대류현상에 대하여 수치해석적으로 접근하였다. GSMAC(Generalized-Simplified Marker and Cell method)법을 이용하여 자성유체의 지배방정식을 풀었으며 외부에서 인가자장의 세기 및 방향에 따른 자연대류현상과 열전달 특성을 수치해석적으로 규명하였다. 자성유체의 자연대류현상은 인가자장의 세기 및 방향에 따라 제어되었다. 자장이 수직방향으로 인가될 경우 자장의 세기 H 가 -4000 일 때 평균 Nusselt 수가 최소가 되었고 자장이 수평방향으로 인가될 경우 자장의 세기 H 가 12000 일 때 평균 Nusselt 수가 최소가 되었다. 또한, 이 지점을 기준으로 자장의 인가방향과 관계없이 자장의 세기가 증가할수록 평균 Nusselt 수가 증가하였다.

Abstract: This study aims to numerically investigate the natural convection characteristics of a magnetic fluid in a cubic cavity. The governing equations of the magnetic fluid are solved using the Generalized-Simplified Marker and Cell Method (GSMAC). The natural convection and heat transfer characteristics of the magnetic fluid were analyzed by varying the intensity and direction of the magnetic field. As a result, it was found that the natural convection characteristics were controlled by the intensity and direction of the magnetic field, and the mean Nusselt numbers were minimized at a vertical intensity of $H=-4000$ and horizontal intensity of $H=12000$ of the magnetic field. In addition, the mean Nusselt numbers increased with the intensities of the magnetic field, regardless of the direction of the magnetic field.

- 기호설명 -

ρ : 자성유체의 밀도
 t : 시간
 v : 속도벡터
 T : 응력텐서
 b : 단위질량당 외력
 I : 단위질량당 입자 관성모멘트 합
 Ω : 입자의 각속도벡터
 A : 우응력 텐서
 ϵ : Levi-civita의 기호
 l : 단위질량당 체적우력벡터
 T : 온도
 s : 단위질량당 엔트로피

q : 열유속밀도벡터
 Φ : 산일함수
 γ : 단위 질량당 열원의 강도
 M : 자화벡터
 χ_m : 자화율
 I : Idemfactor
 τ : 유체마찰에 의한 회전운동의 완화시간
 H : 자장벡터
 B : 자속밀도 벡터
 μ_0 : 진공중의 투자율
 p : 압력
 Re : Reynolds 수
 η : 점성계수
 ϵ : 극성효과 변수(Parameter)
 σ : 자성효과 변수(Parameter)
 Pe : Peclet 수

† Corresponding Author, mylee@dau.ac.kr

- Pe_r : 회전 Peclet 수
 M_0 : 평형자화의 세기
 ω : 회전각속도벡터
 Gr : Grashof 수
 β : 체적팽창계수
 e : 중력가속도 방향의 단위벡터
 C_p : 정압비열
 κ : 열전도율
 η_1 : 분산입자의 와점성계수

상첨자

* : 무차원량 표시

1. 서 론

자성유체(Magnetic fluid)는 지름 10 nm 정도의 마그네타이트(Magnetite), 페라이트(Ferrite), 철, 니켈 등과 같은 강자성체 미립자를 침전이나 응집이 생기지 않도록 오레인산 등의 계면활성제로 특수표면처리를 하여 에텔, 에스텔, 케로진 또는 순수한 물 등의 액체 용액 속에 안정하게 혼합시킨 콜로이드(Colloid) 상태의 현탁액(Suspension)이다. 특히 금속 특유의 강자성과 유체특유의 유동성을 겸비한 유체로 외견상 액상 자체가 자성을 갖는 것처럼 인공적으로 만들어진 고액혼상유체이다.⁽¹⁾

이러한 자성유체는 계면활성제 첨가로 인하여 분산성이 우수하고 중력, 원심력, 외부자장 등의 작용 하에서 침강이나 응집 등의 고액 분리 현상은 물론 분산입자 농도에도 영향을 주지 않는다.⁽²⁾ 이러한 이유로 자성유체는 외부자장과 상호작용하는 성질과 미립자가 내부 각 운동량을 갖는 특성을 제외하면 외견상 뉴턴유체와 유사한 유체 거동을 보인다.

자성유체의 열전달 및 대류현상에 관한 연구는 다음과 같다. Ryu 등⁽³⁾은 자성유체의 일부분이 가열된 상태인 모델을 인가자장의 변화에 따른 자연대류현상을 관찰하는 연구를 진행하였고, Ashouri 등⁽⁴⁾은 가열면에 영구자석이 위치한 사각형 공간에서 자성유체의 자장 매개변수와 상관계수를 조사하였다. 그리고 Yamaguchi 등⁽⁵⁾은 균일한 자장이 인가되는 사각형 공간에서 자성유체의 자연대류현상에 대하여 실험적 및 수치적으로 연구하여 자장 및 자화가 온도에 의해 영향을 받

는다는 결과를 나타내었다. 그러나 외부자장의 세기 및 방향을 변화시킨 다양한 조건에서 자성유체의 열역학적 성질과 열전도 및 대류에 관한 심도 있는 연구는 아직 미비한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 작동유체로 자성유체를 사용하여 밀폐된 정방형관 내에서 인가자장의 방향과 세기에 따른 열유동의 형상변화 및 열전달 특성을 파악하고자 한다.

수치해석을 수행하는데 있어서 자성유체의 입자회전을 고려한 극성유체이론인 Tanahashi 등⁽⁶⁾의 식을 이용하여, 자연대류 문제에 대한 알고리즘(Algorithm)을 작성하고, Kawai 등이 제안한 GSMAC (Generalized-Simplified Marker and Cell method) 유한요소법을 이용하고 이를 수치해석하기 위하여 FORTRAN Power Station 4.0을 이용하였다.⁽⁷⁾

2. 지배방정식 및 해석모델

2.1 지배방정식

자성유체는 자장의 영향에 따라 내부입자가 자화되어 회전을 하게 되며, 자성유체의 거시적인 자연대류현상에 영향을 준다. 이러한 현상을 고려하여 자성유체의 자연대류현상을 고찰하기 위해서 일반적인 뉴턴유체의 방정식계, 내부각운동량방정식, 자화의 구성방정식 및 전자장 방정식을 풀어야 한다. 따라서 본 연구에서는 자성유체의 자연대류현상을 해석하기 위하여 Tanahashi에 의해 제안된 지배방정식을 사용하였다.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

운동방정식

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \nabla \cdot \mathbf{T} + \rho \mathbf{b} \quad (2)$$

각운동량방정식

$$I \frac{d\Omega}{dt} = \nabla \cdot \mathbf{A} + \mathbf{e} : \mathbf{T} + \rho \mathbf{l} \quad (3)$$

에너지방정식

$$\rho T \frac{ds}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{q} + \Phi + \rho \gamma \quad (4)$$

자화의 구성방정식

$$\mathbf{M} = \chi_m (\mathbf{I} - \tau \Omega \cdot \mathbf{e}) \cdot \mathbf{H} \quad (5)$$

Maxwell의 자장방정식

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M} \quad (8)$$

Park 등(2002)은 Boussinesq 근사 이론과 자화의 완화방정식의 근사식을 이용하여 무차원 지배방정식을 다음과 같이 무차원 방정식으로 정리하였다.⁽⁸⁾ 지배방정식의 무차원화에 사용된 속도 \mathbf{v}^* , 시간 t 및 온도 T 의 대표량은 각각 $U_r \mathbf{v}^*$, $t^* L_r / U_r$ 및 $T_c + \nabla T T^*$ 으로 나타내었다. 여기서 L_r 및 U_r 은 길이 및 속도의 대표량이다.

연속방정식

$$\nabla^* \cdot \mathbf{v}^* = 0 \quad (9)$$

운동방정식

$$\frac{\partial \mathbf{v}^*}{\partial t^*} + (\mathbf{v}^* \cdot \nabla^*) \mathbf{v}^* = -\nabla^* p^* \quad (10)$$

$$+ \frac{1}{Re} \{ \nabla^* \cdot (\eta^* \nabla \mathbf{v}^*) + \nabla^* \cdot (\eta^* \mathbf{v}^* \nabla^*) \}$$

$$+ \frac{4 \varepsilon \sigma}{Re Pe_r} \mathbf{M}^* \cdot \nabla^* \mathbf{H}^* - \frac{2 \varepsilon}{Re} \nabla^* \times (\sigma H^* M_0^* A_1 \omega^*)$$

$$+ \frac{Gr}{Re^2} \beta^* T^* \mathbf{e}$$

에너지방정식

$$\frac{dT^*}{dt^*} = \frac{1}{C_p^* Pe} \nabla^* \cdot (\kappa^* \nabla^* T^*) \quad (11)$$

자화의 구성방정식

$$\mathbf{M}^* = \frac{M_0^*}{H^*} (\mathbf{H}^* - Pe_r A_1 \mathbf{H}^* \times \omega^*) \quad (12)$$

$$A_1 = \tau^* \eta_1^* / (\eta_1^* + \sigma H^* M_0^* \tau^*)$$

방정식을 계산하기 위해 사용되는 무차원수인 Reynold 수, Grashof 수, Prandtl 수 그리고 Rayleigh 수는 식 (13)에서 식 (16)을 이용하여 계산하였으며, Nusselt 수는 식 (17)을 이용하여 자장의 세기 및 방향에 따른 국소 Nusselt 수를 계산하였다.

$$Re = \frac{v L \rho}{\eta} \quad (13)$$

$$Gr = \frac{\beta \Delta T g L^3 \rho^2}{\eta^2} \quad (14)$$

$$Pr = \frac{C_p \eta}{\kappa} \quad (15)$$

$$Ra = Pr \cdot Gr \quad (16)$$

$$Nu = \frac{T_{hot} - T}{\Delta T} \quad (17)$$

2.2 해석모델

본 연구에서는 베이스 용액으로 물을 사용하여 제조된 자성유체(Ferricolloid W-40)를 작동유체로 하였고, 수치해석에서 해석모델은 Fig. 1에 나타내었다. 수치해석에 필요한 자성유체의 물성치는 Kamiyama 등 (1983)⁽⁹⁾에 의해 제시된 것을 사용하였고 그 값을 Table 1에 나타내었다. 또한 자성유체의 비열, 체적팽창계수 및 열전도율은 모액인 물의 물성치와 같은 값으로 가정하였다. 해석모델은 20×20의 균일격자를 사용하여 해석을 진행하였고, Fig. 2에 경계조건을 나타내었다. 즉 면(CB선상)이 고온인 조건에서 수치해석을 진행하였고, 고온벽면과 저온벽면의 온도는 각 320K와 300K로 설정하였다. 속도경계조건으로 모든 벽면에서 no-slip 조건으로 가정하였고(U=V=0), 초기 조건으로 전 영역에서 U=V=0, p=0로 한다.⁽¹⁰⁾ 수치해석은 Δt=0.5로 하여 현 시점과 전 시점의 온도차 최대치가 10⁻⁴이하로 되었을 때를 정상상태로 간주하여 계산을 종료하였다. 또한 자연대류의 형상 변화를 뚜렷이 하기 위해 Grashof 수는 1000으로 고정하였다.⁽¹¹⁾

Table 1 Properties of magnetic fluid (W-40)

Properties	W-40
Density, ρ (kg/m ³)	1.37×10 ³
Density of particle, ρ_a (kg/m ³)	5.16×10 ³
Saturation magnetization (Wb/m ²)	0.36
Vortex viscosity of particle, η_1 (Pa·s)	2.18×10 ⁻³
Viscosity, η (Pa·s)	1.06×10 ⁻²
Volume concentration of particle, ϕ_a	8.68×10 ⁻²
Particle number per unit volume, N (EA/m ³)	1.25×10 ²³
Boltzmann constant, k (J/K)	1.38×10 ⁻²³

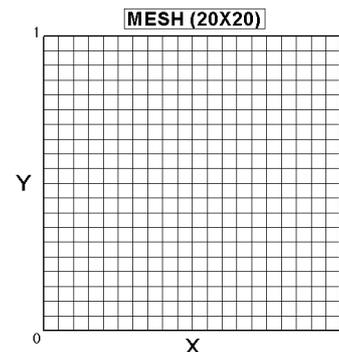


Fig. 1 Mesh design

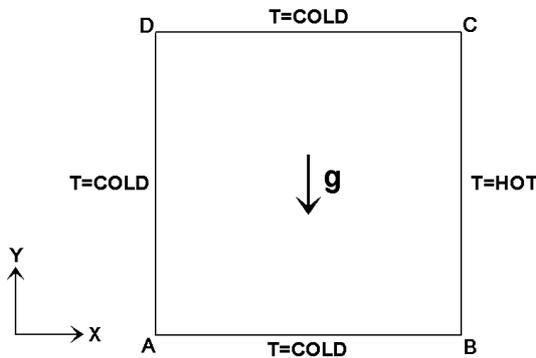


Fig. 2 Boundary conditions

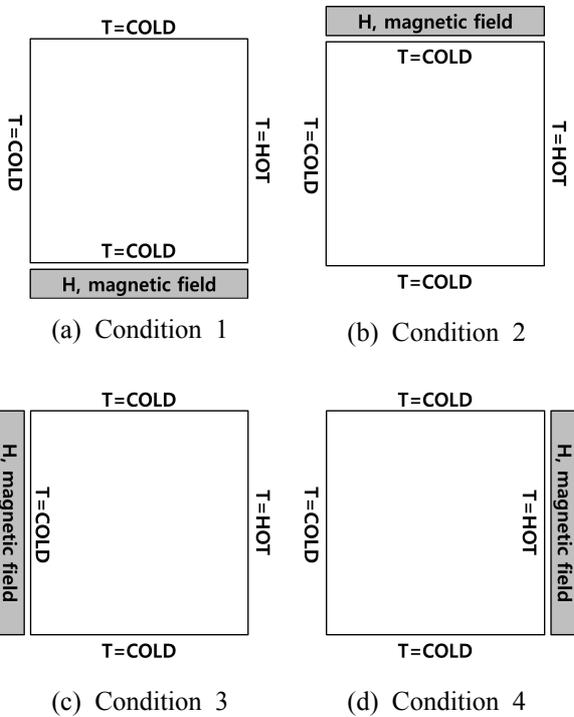


Fig. 3 Various boundary conditions

자성유체의 경우 인가자장의 세기, 방향, 구배에 의하여 유동현상이 변하기 때문에 다음 세 가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 먼저 외부에서 가한 자장이 없는 경우와 연직 상하방향으로 일정한 자장구배를 인가한 경우, 그리고 좌우 수평방향으로 일정한 자장구배를 인가한 경우에 대하여 자성유체의 자연대류현상을 고찰하였다. Fig. 3은 본 연구에서 사용한 수치해석 조건이다. Fig. 3의 (a) condition 1은 Fig. 2의 경계 조건에서 정방향관 내에서 인가자장의 위치가 하단면일 경우이고, (b) condition 2는 상단면, (c)

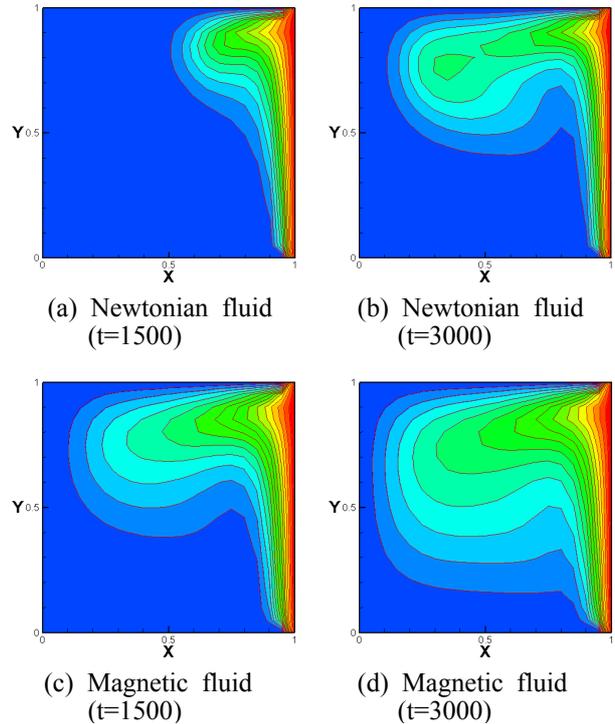


Fig. 4 Comparisons of the isotherms between Newtonian and Magnetic fluids (hot surface = right side)

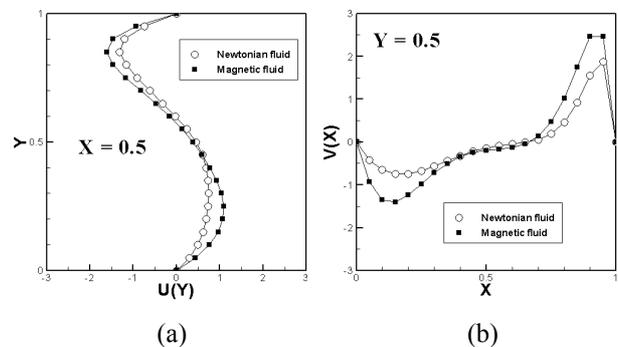


Fig. 5 Comparisons of the velocity distributions between Newtonian and magnetic fluids at t=3000 (hot surface = right side)

condition 3은 좌측단면, (d) condition 4는 우측단면에 인가자장이 각각 위치한 경우이다. 해석결과에서 유선은 유동함수의 값이 0인 것로부터 $\Delta\zeta$ 의 간격이고 등온선은 0.05 간격이다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 뉴턴유체 vs 자성유체

뉴턴유체와 자성유체의 자연대류거동을 파악하기 위하여 인가자장이 없는 경우에 뉴턴유체와

자성유체의 자연대류현상을 고찰하였다. Fig. 4는 인가자장이 없는 경우의 뉴턴유체와 자성유체의 등온선도를 나타낸다. 시간에 따른 등온선도의 변화를 보면, 자성유체가 뉴턴유체에 비하여 열전달 현상이 활발하게 발생되지만 전반적인 열전달 형상은 유사하게 나타났다. Fig. 5는 $t=3000$ 일 때 $X=0.5$ 과 $Y=0.5$ 지점에서의 자성유체와 뉴턴유체의 속도분포를 나타낸다. 자성유체는 뉴턴유체에 비하여 열전달 속도는 크게 나타나지만 열전달 방향은 유사하게 나타났다. 이상의 결과로부터 인가자장이 없는 경우에 자성유체는 뉴턴유체와 비교하여 유사한 유동 특성을 가짐을 알 수 있다. 이러한 이유로는 인가자장이 없는 경우에 자연대류현상은 온도차에 의한 밀도차에 기인하여 발생되기 때문에 자성유체는 뉴턴유체와 유사한 특성을 나타내었다. 그러나 자성유체에 자장을 인가하게 되면 인가자장 방향으로 자기체적력이 발생하여 내부입자와 인가자장 간에는 인력이 작용하고 내부입자 간에는 척력이 작용하기 때문에 자성유체의 자연대류현상은 온도차와 함께 자기체적력의 영향을 받게 되어 뉴턴유체와 다른 특성을 가지게 된다.⁽¹²⁾

3.2 자성유체의 거동

3.2.1 인가자장에 따른 등온선도 변화

본 연구에서는 정방형관 내에서 인가자장의 변화에 따른 자성유체의 등온선도 변화를 나타내었다. 여기서 하단 및 좌측단면 방향에서 인가자장은 양($H>0$)으로 나타냈고 상단 및 우측단면 방향에서 인가자장은 음($H<0$)으로 나타냈으며, 무자장의 경우는 $0(H=0)$ 으로 나타냈다. Figs. 6, 7, 8, 9는 시간 1500초인 경우 정방형관 내에서 인가자장 세기에 따른 자성유체의 등온선도 변화를 나타내었다.

Fig. 6은 정방형관 내에서 하단면에 인가자장을 가한 경우의 자성유체 등온선도 변화를 나타낸다. Fig. 6(a)에서 알 수 있듯이 $H=0$ 인 경우 자성유체는 인가자장이 없기 때문에 뉴턴유체와 유사한 거동을 나타내고 있으며, 자성유체 등온선도는 온도차에 기인한 밀도차에 의하여 발생된다. 또한 상부에서 발달된 고온영역은 하부로 이동하는 열전달 현상을 나타낸다. Figs. 6(b), (c), (d)는 하단면에 인가자장 세기를 증가시킬 경우 상부의 고온영역이 크게 발달함을 나타내고 있다.

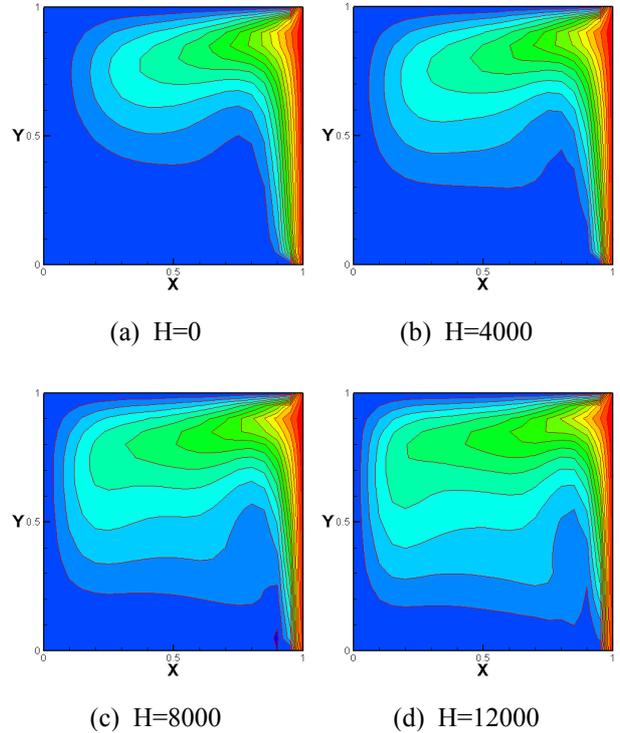


Fig. 6 Isotherms with various magnetic intensities at $t=1500$ seconds (condition 1 : position of the magnetic field = bottom and hot surface = right side)

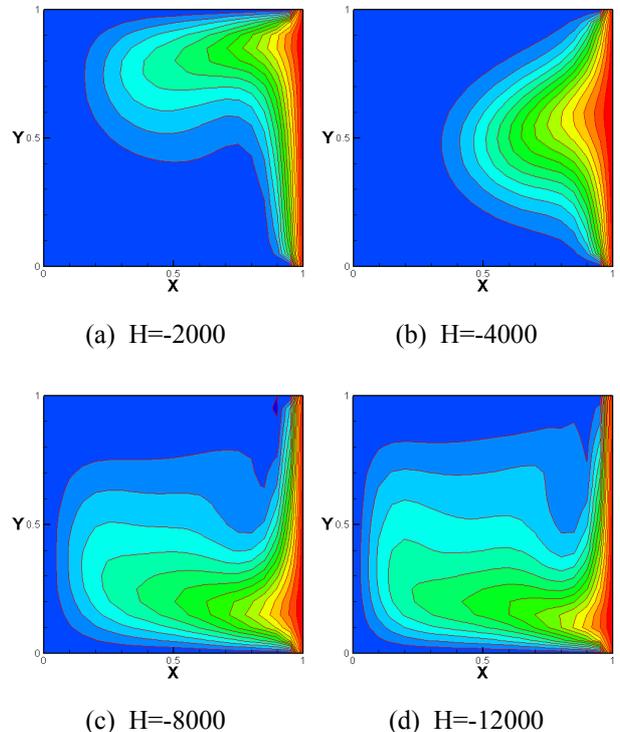


Fig. 7 Isotherms with various magnetic intensities at $t=1500$ (condition 2 : position of the magnetic field = top and hot surface = right side)

Fig. 7은 정방형관 내에서 상단면에 인가자장을 가한 경우 자성유체 등온선도 변화를 나타낸다. 상단면에 자장을 인가했을 경우의 등온선도 변화는 하단면의 결과와 반대 경향을 나타낸다. 즉 상부에서 발달된 고온영역은 인가자장의 세기가 증가함에 따라 하부로 이동하게 된다. 또한, Fig. 7(b)의 $H=-4000$ 인 경우에서 알 수 있듯이 고온 영역의 확산은 마치 무중력상태에서 전도에 의해 열전달이 이루어지는 것처럼 등온선도가 나타났다. 이러한 이유로는 정방형관 내에서 부력과 자기체적력이 서로 균형을 유지하게 되기 때문이다.

Fig. 8은 정방형관 내에서 좌측단면에 인가자장을 가한 경우의 자성유체 등온선도 변화를 나타낸다. Fig. 8(a)에서 보면 자장을 인가하지 않았을 때 자성유체는 상부에서 고온영역이 발달하여 하부로 이동하는 것을 알 수 있다. 그러나 Figs. 8(b), (c), (d)에서 알 수 있듯이 좌측단면에 인가자장을 증가시킬 경우 고온영역은 인가자장의 반대 방향으로 축소하게 된다. 이러한 이유로는 정방형관 내에서 고온단면의 반대방향에 자장을 인가한 경우 고온단면에서 시작되는 열확산방향과 같은 방향으로 자기 체적력이 작용하여 열확산 속도가 감소하기 때문이다.

Fig. 9 정방형관 내에서 우측단면에 인가자장을 가한 경우 자성유체 등온선도 변화를 나타낸다. 우측단면에 가해지는 인가자장의 세기를 증가 시킬수록 우측단면의 고온영역이 정방형관 전체로 발달하고 있음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 8의 결과와 반대되는 현상으로 열확산 및 자기체적력 방향이 서로 반대로 작용하여 고온영역의 열확산 속도가 증가했기 때문이다. 또한, Fig. 9(d)의 $H=-12000$ 인 경우를 보면 우측단면 상부에서 시작된 열확산이 강한 자장의 영향으로 인해 고온단면의 열유동점 주변에서 난류형상의 대류열전달이 나타나는 것을 알 수 있다.

3.2.2 시간에 따른 등온선도 변화

본 연구에서는 정방형관 내에서 수치해석 조건과 인가자장 및 시간경과에 따른 등온선도 변화를 나타낸다. Figs. 10, 11은 정방형관 내에서 (a)는 하단면에 $H=4000$, (b)는 상단면에 $H=-4000$, (c)는 좌측단면에 $H=4000$, (d)는 우측단면에 $H=-4000$ 으로 자장을 인가한 경우이다. Fig. 11은

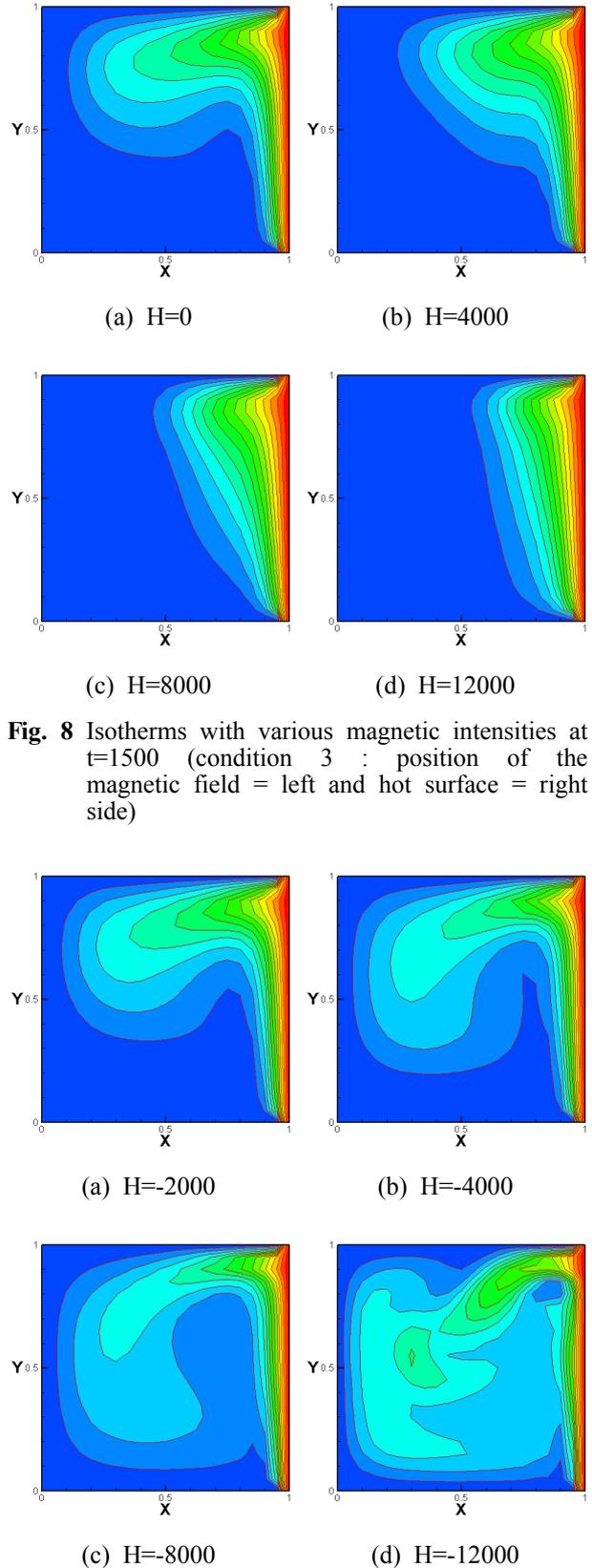


Fig. 8 Isotherms with various magnetic intensities at $t=1500$ (condition 3 : position of the magnetic field = left and hot surface = right side)

Fig. 9 Isotherms with various magnetic intensities at $t=1500$ (condition 4 : position of the magnetic field = right and hot surface = right side)

시간이 3000초에서 정방형관 내 자성유체의 등온선도를 나타내고 있으며, 이것은 시간이 1500초 경과된 후에 등온선도인 Fig. 10의 발달된 모습으로 등온선도가 충분히 발달되었다고 판단하여 3000초에서 정상상태가 되었음을 의미한다. 즉 시간이 3000초 이상에는 정방형관 내 자성유체의 열전달은 시간이 경과함에 따라 더 이상의 확산이 이루어지지 않았기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 시간이 3000초 경과된 시점부터는 정상상태로 간주하였다.

이상의 결과로부터 정방형관 내에 자성유체는 인가자장의 세기 및 방향에 따라 열전달 흐름이 변화하고 인가자장의 시간이 증가함에 따라 열전달 흐름이 정상상태가 됨을 알 수 있다. 이러한 이유로는 자성유체는 인가자장에 의한 자기체적력과 온도차에 의한 부력의 영향을 동시에 받기 때문이다. 또한, 인가자장 방향 반대편에서 열전달이 촉진되거나 억제되는 이유는 자기체적력에 의하여 밀도가 큰 저온의 유체가 인가자장 방향으로 정렬되고, 밀도가 작은 고온의 유체는 밀도가 큰 저온유체에 밀려서 인가자장 반대방향으로 정렬되기 때문이다.⁽¹³⁾ 따라서 정방형관 내에서 자성유체의 열전달 특성은 인가자장의 세기와 방향으로 제어할 수 있으며, 밀폐된 관내에서 작동 유체로 자성유체를 사용하는 경우 관내 유동을 외부자장으로 제어할 수 있게 된다.

3.2.3 속도벡터 변화

본 연구에서는 정방형관 내에서 수치해석 조건에 따라 자장을 인가하였을 경우 측정위치에 따른 속도벡터 변화를 나타낸다.

Fig. 12는 정방형관 내 하단면($H \geq 0$)과 상단면($H < 0$)에 자장을 인가하였을 경우 시간이 1500초 경과한 지점에서 속도벡터 변화를 나타낸다. Fig. 12(a)는 $X=0.5$ 지점에서 정방형관 내 하단면에 자장을 인가하였을 경우 속도벡터를 나타내고 있으며, 인가자장이 증가할수록 속도벡터는 정방형관 내 상부에서는 좌측방향으로 증가하고 하부에서는 우측방향으로 증가하였다. 반대로 정방형관 내 상단면에 자장을 인가하였을 경우 $X=0.5$ 지점에서 속도벡터는 정방형관 내 상부에서는 우측방향으로 증가하고 하부에서는 좌측방향으로 증가하였다. 또한, Fig. 12(b)는 $Y=0.5$ 지점에서 정방형관 내 하단면에 자장을 인가하였을 경우 속도

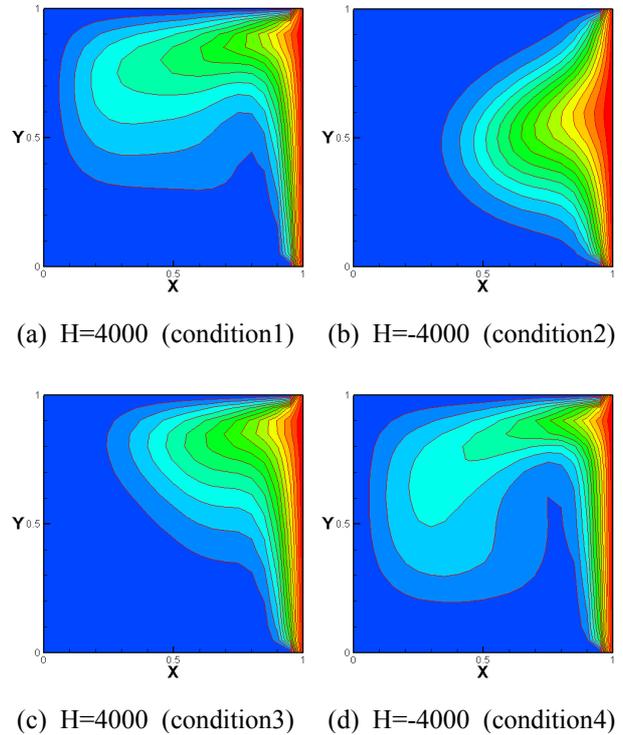


Fig. 10 Isotherms with various conditions at t=1500

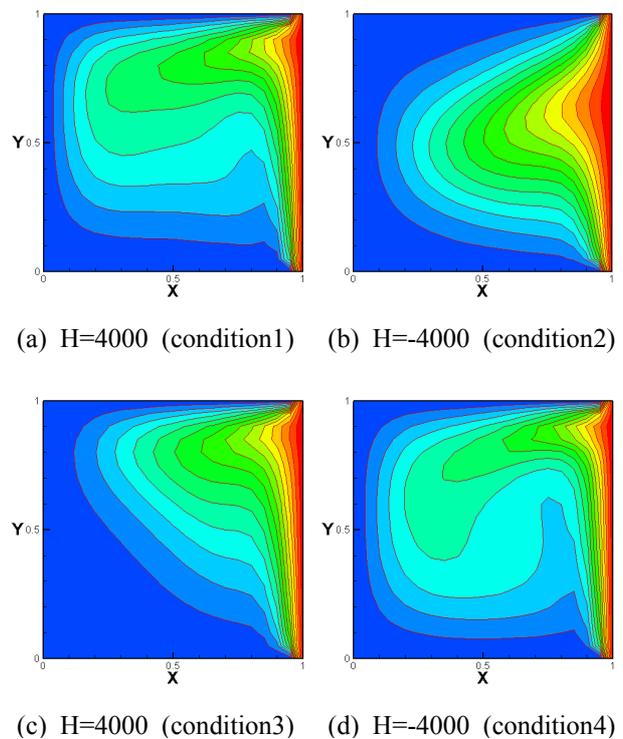
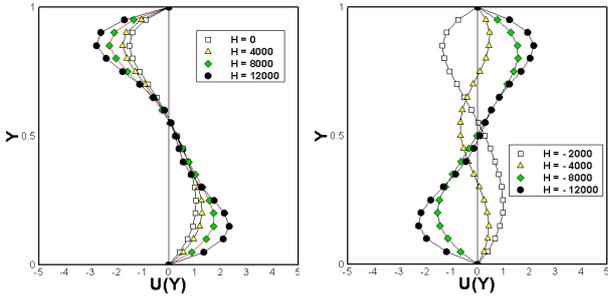
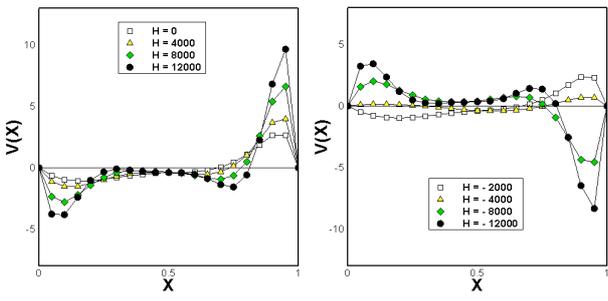


Fig. 11 Isotherms with various conditions at t=3000

벡터는 좌측에서는 아랫방향으로 증가하고 우측에서는 윗방향으로 증가하였다. 반대로 정방형관 내 상단면에 자장을 인가하였을 경우 $Y=0.5$ 지점

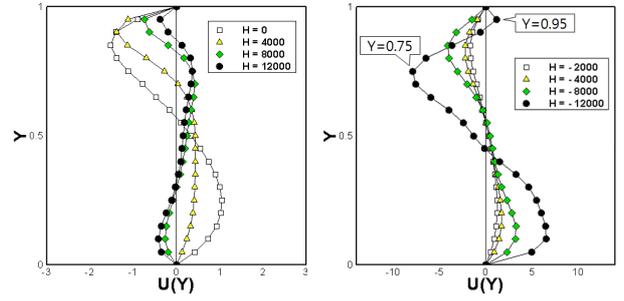


(a) X=0.5

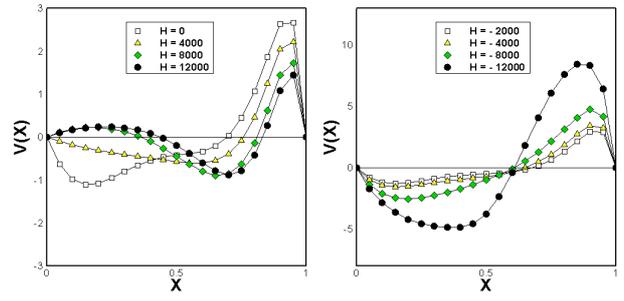


(b) Y=0.5

Fig. 12 Velocity distributions with various magnetic intensities at $t=1500$ (conditions 1 and 2 : vertical magnetic fields and hot surface = right side)



(a) X=0.5

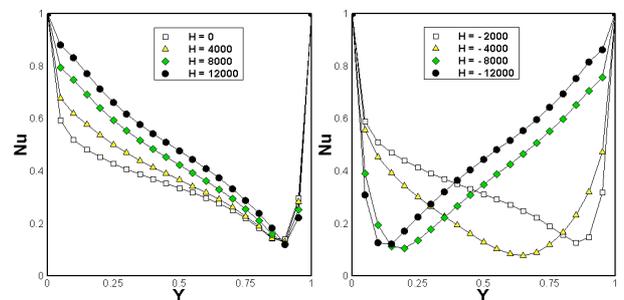


(b) Y=0.5

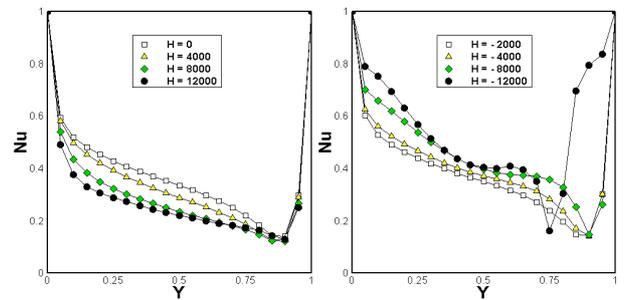
Fig. 13 Velocity distributions with various magnetic intensities at $t=1500$ (condition 3 and 4 : horizontal magnetic fields and hot surface = right side)

에서 속도벡터는 정방형관 내 좌측에서는 윗방향으로 증가하고 우측에서는 아랫방향으로 증가하였다. 이러한 결과는 정방형관 내 자연대류 흐름은 하단면에 자장을 인가하였을 경우에는 반시계 방향으로 움직이고 상단면에 자장을 인가하였을 경우에는 시계 방향으로 움직이며 인가자장이 증가할수록 대류열전달이 활발해지기 때문이다.

Fig. 13은 정방형관 내 좌측단면($H \geq 0$)과 우측단면($H < 0$)에 자장을 인가하였을 경우 시간이 1500초 경과한 지점에서 속도분포를 나타낸다. Fig. 13(a)는 $X=0.5$ 지점에서 정방형관 내 좌측단면에 자장을 인가하였을 경우 속도벡터를 나타내고 있으며, 인가자장이 증가할수록 속도벡터는 정방형관 내 상부에서는 우측방향으로 감소하고 하부에서는 좌측방향으로 증가하게 된다. 반대로 정방형관 내 우측단면에 자장을 인가하였을 경우 $X=0.5$ 지점의 속도벡터는 정방형관 내 상부에서는 좌측방향으로 증가하고 하부에서는 우측방향으로 증가하게 된다. 이러한 이유로는 좌측단면에 자장을 인가할 경우 자성유체의 자연대류현상이 축소하여 대류열전달이 억제되기 때문이다. 또한, Fig. 13(a)에서 $H=-12000$ 의 경우 속도벡터가 $Y=0.95$ 지점에서는 우측방향으로 증가하고 $Y=0.75$



(a) Conditions 1 and 2 (vertical magnetic fields)



(b) Conditions 3 and 4 (horizontal magnetic fields)

Fig. 14 Local Nusselt number in Y-axis with various magnetic intensities at $t=3000$ and $X=1$

지점에서는 좌측방향으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로는 정방형관 내에 강한 자장

을 인가할 경우 자성유체는 부력과 중력보다는 자기체적력의 영향을 더 많이 받기 때문이다. 또한, Fig. 13(b)는 $Y=0.5$ 지점에서 정방형관 내 좌측 단면에 자장을 인가하였을 경우 속도벡터는 인가 자장이 증가할수록 좌측에서는 윗방향으로 증가하고 우측에서는 아랫방향으로 증가하였다. 반대로 정방형관 내 우측 단면에 자장을 인가하였을 경우 $Y=0.5$ 지점에서 속도벡터는 정방형관 내 좌측에서는 아랫방향으로 증가하고 우측에서는 윗방향으로 증가하였다.

3.2.3 열전달 계수

본 연구에서는 시간이 3000초 지점인 자성유체가 정상상태가 되었을 경우에 정방형관 내 우측 단면에서 인가자장 세기 및 방향에 따른 Nusselt 수를 비교하였다.

Fig. 14(a)는 정방형관 내에서 하단면($H \geq 0$)과 상단면($H < 0$)에 인가자장 세기에 따른 자성유체의 Nusselt 수를 나타낸다. 하단면에서 인가자장을 증가하였을 경우 $Y=0.9$ 지점에서 Nusselt 수가 최소가 되었으며, 상단면에서 인가자장을 증가시켰을 경우 $Y=0.1$ 지점에서 Nusselt 수가 최소가 되었

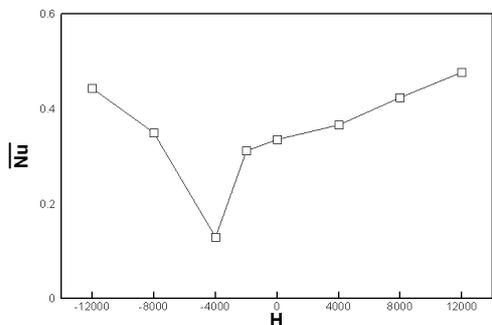
다. 즉 대류열전달의 정체지점이라고 할 수 있는 최소 Nusselt 수는 하단면에 자장을 인가하였을 경우 우측단면 상부에 위치하였고 상단면에 자장을 인가하였을 경우 우측단면 하부로 이동하는 것을 알 수 있다. 또한 정방형관 내 수직으로 인가되는 자장의 세기가 증가할수록 인가방향에 관계없이 Nusselt 수는 증가하였다. Fig. 14(b)는 정방형관 내 좌측단면($H \geq 0$)과 우측단면($H < 0$)에 인가자장 세기에 따른 자성유체의 Nusselt 수를 나타낸다. 좌측단면에서 인가자장을 증가하였을 경우 $Y=0.9$ 지점에 Nusselt 수가 최소가 되었으며, 우측단면에서 인가자장을 증가하였을 경우 $Y=0.9$ 지점에 Nusselt 수가 최소가 되었다. 또한 정방형관 내 우측단면에 인가자장을 증가시킬수록 Nusselt 수는 증가하였지만 좌측단면에 인가자장을 증가시킬 경우에는 Nusselt 수는 감소하였다. Fig. 15는 정방형관 내에서 우측 단면에 인가자장 세기에 따른 자성유체의 평균 Nusselt 수를 나타낸다. Fig. 15(a)는 정방형관 내 하단면($H \geq 0$)과 상단면($H < 0$)에 인가자장 세기에 따른 자성유체의 평균 Nusselt 수이며, 인가자장 $H=-4000$ 에서 0.1291로 최소가 되었다. Fig. 15(b)는 정방형관 내 좌측단면($H \geq 0$)과 우측단면($H < 0$)에 인가자장 세기에 따른 자성유체의 평균 Nusselt 수이며, 인가자장 $H=12000$ 에서 0.2197로 최소가 되었다. 또한, 평균 Nusselt 수가 최소인 지점을 기준으로 인가자장 방향에 관계없이 인가자장 세기가 증가할수록 평균 Nusselt 수는 증가하였다.

4. 결론

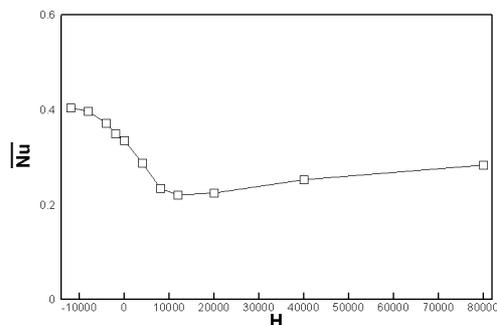
본 연구에서는 정방형관 내에서 인가자장의 세기 및 방향 변화에 자연대류현상과 열전달 특성을 이론적으로 고찰하였다. 특히, GSMAC법을 이용한 강자성체 미립자의 내부회전을 고려한 자성유체의 지배방정식에 대한 수치해석을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 자성유체는 자장을 인가하지 않을 경우 뉴턴유체와 유사한 거동을 하였다.

(2) 자성유체는 인가자장에 의한 자기체적력과 온도차에 의한 부력의 영향을 동시에 받으므로, 인가자장의 방향에 따라 열전달이 촉진되거나 억제된다. 또한, 인가자장 세기 및 방향에 따라 자성유체의 열전달 흐름이 변화하였고 인가자장 시간($t=3000$ 초)이 증가함에 따라 열전달 흐름은 정상상태가 되었다.



(a) Conditions 1 and 2 (vertical magnetic fields)



(b) Conditions 3 and 4 (horizontal magnetic fields)

Fig. 15 Mean Nusselt number with various magnetic intensities at $t=3000$

(3) 정방형관 내에서 자성유체에 강한 자장 ($H=12000$)을 인가할 경우 자성유체는 부력과 중력보다는 자기체적력의 영향을 더 많이 받는다.

(4) 정방형관 내 자성유체의 속도벡터는 하단면에 자장을 인가하였을 경우에는 반시계 방향으로 움직이고 상단면에 자장을 인가하였을 경우에는 시계 방향으로 움직이며 인가자장이 증가할수록 대류열전달이 활발하였다.

(5) 정방형관 내 자장이 수직방향으로 인가될 경우에는 인가자장 $H=4000$ 에서 평균 Nusselt 수 0.1291로 최소가 되었 으며, 자장이 수평방향으로 인가될 경우에는 $H=12000$ 에서 평균 Nusselt 수 0.2197로 최소가 되었다. 또한, 이 지점을 기준으로 인가자장 방향에 관계없이 인가자장 세기가 증가할수록 평균 Nusselt 수는 증가하였다.

후 기

본 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Park, J. W., Ryu, S. O. and Seo, L. S., 1999, "A Study on the Flow Behavior of Magnetic Fluids in a Circular Pipe with a Vertical Magnetic Field," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 23, No. 1, pp. 25~32.
- (2) Ahn, C. H., Nam, Y. J. and Park, M. K., 2004, "Position Control of Capsule Filled with Magnetic Fluid for Targeted Drug Delivery System," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 28, No. 8, pp. 1166~1173.
- (3) Ryu, S. O., Park, J. W. and Seo, L. S., 2001, "A Study on the Flow Analysis for Natural Convection of Magnetic Fluid in a Cubic Cavity," *Proc. of the KSME Annual Meeting*, Vol. 1, No. 5, pp. 142~147.
- (4) Ashouri, M., Ebrahimi, B., Shafii, M. B., Saidi, M. H. and Saidi, M. S., 2010, "Correlation for Nusselt Number in Pure Magnetic Convection Ferrofluid Flow in a Square Cavity by a Numerical Investigation," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 322, No. 22, pp. 3607~3613.
- (5) Yamaguchi, H., Niu, X. D., Zhang, X. R. and Yoshikawa, K., 2009, "Experimental and Numerical Investigation of Natural Convection of Magnetic Fluids in a Cubic Cavity," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 321, No. 22, pp. 3665~3670.
- (6) Tanahashi, T., Sawada, T., Shizawa, K. and Ando, T., 1983, "Response of Ferrofluids in Annular Pipes Under the Influence of External Magnetic Fields," *Trans. of the JSME (B)*, Vol. 49, No.447, pp. 2513~2521.
- (7) Kawai, H., Katoh, Y., Sawada, T. and Tanahashi, T., 1990 "GSMAC-FEM for Incompressible Viscous Flow Analysis(A Modified GSMAC Method)," *JSME International Journal, Series II*, Vol. 33, No.1, pp.17~25.
- (8) Park, J. W., Jun, C. H., Seo, L. S. and Ryu, S. O., 2002, "Characteristics of Heat Transfer of Natural Convection for Magnetic Fluids in Annular Pipes," *Journal of Korean Magnetics Society*, Vol. 12, No. 2, pp. 73~79.
- (9) Kamiyama, S., Koike, K. and Oyama, T., 1983, "Pipe Flow Resistance of Magnetic Fluids in a Nonuniform Transverse Magnetic Field," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 39, No. 1-2, pp. 23~26.
- (10) Jin, S. H., Park, J. W. and Seo, L. S., 2001, "Numerical Analysis on the Characteristic Benard Flow and Control of Magnetic Fluid," *Proc. of the SAREK Winter Annual Meeting*, pp. 280~285.
- (11) Jin, S. H., 2001, A Numerical Analysis on the Characteristic Benard Flow and Control of Magnetic Fluid, Master Thesis, Dong-A Univ., Korea.
- (12) Park, J. W., Lee, J. H. and Seo, L. S., 2001, "Experimental Study of Natural Convection for Magnetic Fluids in Annular Pipes under the Influence of External Magnetic Fields," *Journal of Korean Magnetics Society*, Vol. 11, No. 6, pp. 245~249.
- (13) Park, J. W., 2003, 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.