

# GSMAC법을 이용한 밀폐된 정방형관내 자성유체의 열-유동 특성에 관한 해석적 연구

서재형<sup>1</sup>, 이무연<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>동아대학교 대학원, <sup>2</sup>동아대학교 기계공학과

## Numerical analysis on thermal-fluidic characteristics of the magnetic fluid in a cavity using GSMAC

Jae-Hyeong Seo<sup>1</sup> and Moo-Yeon Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Mechanical Engineering, Dong-A University

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Dong-A University

**요약** 본 연구에서는 자성유체의 열-유동 특성을 고찰하기 위하여 밀폐된 정방형관내 자성유체의 열-유동 특성에 관하여 GSMAC법을 이용하여 수치해석적으로 접근하였다. 자성유체의 지배방정식은 자연대류의 연속, 운동량 및 에너지 방정식과 나노자장입자의 자장 및 자화방정식을 추가로 고려하였고 밀폐된 정방형관의 외부에서 가하는 인가자장 세기 및 방향에 따른 자성유체의 온도 및 열전달계수 등의 열전달 특성과 유선 및 등온선도 등의 유동 특성의 변화를 규명하였다. 그 결과, 정방형관내 자장이 수평방향으로 인가될 경우 인가자장  $H=6000$ 에서 평균 Nusselt 수가 0.1592가 되었으며, 자성유체의 열-유동 현상을 인가자장의 세기 및 방향에 따라 제어할 수 있게 되었다.

**Abstract** The article is aiming to investigate the thermal-fluidic characteristics of magnetic fluid in a cavity using GSMAC (generalized-simplified marker and cell method). The transport equations of the magnetic fluid are including the continuity equation, momentum equation and energy equation for natural convection and Maxwell equation and magnetization equation of magnetite nano-sized particles motion. In addition, the heat transfer characteristics such as temperatures and Nusselt numbers and flow characteristics such as streamlines and isotherms of the magnetic fluid were analyzed with the intensity and direction of the magnetic fields. As a result, the thermal-fluidic characteristics of the magnetic fluid in a cavity were could be controlled by the intensity and direction of the magnetic fields.

**Key Words** : Heat transfer, Thermal-fluidic characteristics, Magnetic fluid, Magnetic field, Nusselt number

### 1. 서론

산업기술의 발달로 열장치를 포함한 기계장치에서 고효율 열관리는 더욱 중요하게 되었으며, 과학기술의 발달로 인한 기계 및 부품의 소형화와 다기능화 추세로 인하여 부품의 단위면적당 열 밀도는 더욱 증가하게 되었다. 이를 해결하기 위하여 냉각 및 가열을 포함한 열 및 열관리 문제는 더욱 중요하게 대두되고 있으며, 열 문제를 해

결하기 위한 대책으로 냉각장치의 효율 증대에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에는 열전달을 획기적으로 향상시킬 수 있는 고 열전도성 나노유체가 주목을 받고 있으며, 고 열전도성 나노유체는 액상보다 열전도도가 높은 금속 또는 비금속 재료를 나노입자로 가공하여 물이나 오일 등에 균일하게 분산시켜 높은 열전도율과 분산안정성을 갖는 기능성유체를 말한다[1].

열관리에 사용되는 나노유체 중 자기력에 반응하는 유

본 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

\*Corresponding Author : Moo-Yeon Lee (Dong-A Univ.)

Tel: +82-51-200-7642 email: mylee@dau.ac.kr

Received November 21, 2012 Revised February 25, 2013 Accepted March 7, 2013

체를 자성유체라고 하는데, 이 자성유체에 대한 관심이 최근에 와서 더욱 증가하게 되었다. 자성유체는 금속의 강자성과 유체의 유동성을 겸비한 유체로 외견상 액상 자체가 자성을 가지도록 인공적으로 만들어진 고액혼상 유체이다. 1960년대 NASA의 Papell이 무중력 하에서 로켓트의 액체연료를 운반할 목적으로 제조한 것이 시초이며, 이 후 자성유체의 열-유동 특성에 관한 다양한 연구가 진행되었다[2]. 자성유체의 열전달 현상에 관한 기초 연구로서 Ryu et al. (2001)은 2차원 관내 자성유체의 자연대류에 관한 열전달 특성을 실험과 수치해석을 통하여 검토하였고, Okanaga et al. (1987)은 자성유체를 국부 가열할 경우 나타나는 자연대류의 방향과 세기를 인가자장에 의해 제어하는 실험을 수행하였다[3,4]. 현재까지 밝혀진 자성유체 열전달 특성으로는 자성유체는 일반 유체와는 다른 유동특성을 가지며 자장에 반응하여 그 특성을 제어할 수 있다는 것이다. 즉 자성유체는 유입된 용기의 일부를 가열할 때 외부에서 가한 자장의 방향이나 크기를 조절함에 따라 열-유동 현상을 제어할 수 있다는 점이 특징이다[5]. 이러한 자장유체의 특성은 일반 유체에서는 생각할 수 없었던 특성으로 열관리 분야뿐만 아니라 기계공학 여러 부분에서 다양한 응용을 기대할 수 있다. 그러나 자성유체의 열역학적 성질과 열전도 특성 및 자연대류현상에 관한 심층적인 연구는 아직 미비한 상황이며, 자성유체를 열관리 분야에서 보다 적극적으로 활용할 수 있기 위해서는 심도 있는 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 자성유체의 열-유동 특성을 고찰하기 위하여 인가자장의 방향과 세기에 따른 밀폐된 정방형관내 자성유체의 열-유동 특성을 파악하고자 한다. 열특성을 고찰하기 위하여 용기내 자성유체의 위치에 따른 열전달 계수를 계산하였고, 유동특성을 고찰하기 위하여 자성유체의 유선 및 등온선도 분포를 나타내었다.

## 2. 본론

### 2.1 해석모델

본 연구에서 사용한 해석모델을 Fig. 1에 나타내었다. 자성유체로 가득 차있는 밀폐된 정방형관의 관외측 아랫면은 고온 (Hot)으로 유지하고 좌우측 및 윗면은 저온 (Cold)으로 유지하였다. 정방형관내 작동유체는 자성유체의 한 종류인 ferricolloid W-40을 사용하였으며 Table. 1에 물성치를 나타내었다. 여기서 고온조건은 330K, 저온조건은 300K로 설정하였으며 속도경계조건으로는 모든

벽면에서 no-slip 조건으로 가정하였다[6]. 본 연구에서 사용한 초기조건 및 경계조건은 다음과 같다.

- 초기조건 :

$$u_{x=0,1} = u_{y=0,1} = 0, v_{x=0,1} = v_{y=0,1} = 0, p = 0$$

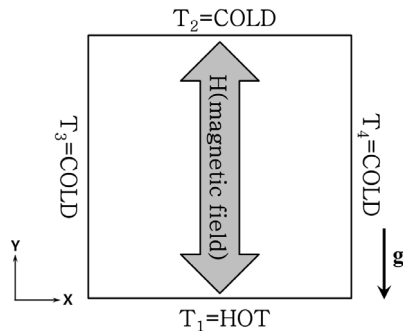
- 경계조건 :

$$T_1 = \text{Hot}, T_2 = T_3 = T_4 = \text{Cold}$$

수치해석은 40×40의 균일격자(Mesh)를 사용하여 자장을 인가하지 않은 경우 (무자장), 정방형관 아랫면에 자장을 인가한 경우 및 윗면에서 자장을 인가한 세 가지 경우에 대하여 자성유체의 열-유동 특성을 고찰하였다. 또한, 수치해석을 수행하는데 있어서 자성유체의 나노입자의 회전은 극성유체이론인 Tanahashi et al. (1984)의 지배방정식을 이용하여 계산하였고 수치해석은 Kawai et al. (1990)이 제안한 GSMAC (Generalized-Simplified Marker and Cell method)법을 이용하여 진행하였다[7,8]. 수치해석은 현 시점과 전 시점의 온도차가 10<sup>-3</sup>이하가 되는 지점을 수렴구간으로 선정하였다.

### 2.2 지배방정식

자성유체는 인가자장의 영향에 따라 내부입자가 자화되어 회전을 하게 되며 자성유체의 거시적인 자연대류 현상에 영향을 준다. 이러한 현상을 고려하여 자성유체 열-유동 현상을 고찰하기 위하여 일반적인 자연대류현상에 대한 지배방정식인 연속방정식, 운동량방정식 및 에너지 방정식뿐만 아니라 자성유체의 특성을 고려한 자화의 구성방정식 및 Maxwell 방정식인 식 (1)에서 식 (4)를 고려하였고, 일반적으로 자연대류에서 많이 사용되는 Boussinesq 근사 이론과 자화 완화방정식의 근사식을 이용하여 자성유체의 지배방정식을 식 (5)에서 식 (8)과 같이 무차원 지배방정식의 형태로 유도하였다[9].



[Fig. 1] Analysis model for magnetic fluid

[Table 1] Properties of ferricolloid W-40 (20°C)

Properties	W-40
Density, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1370
Viscosity, $\eta$ (Pa·s)	$1.06 \times 10^{-2}$
Dynamic viscosity, $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$7.78 \times 10^{-6}$
Specific heat, $C_p$ (kJ/kg K)	3.032
Thermal conductivity, $\kappa$ (W/mK)	4.343

자화의 구성방정식

$$\mathbf{M} = \chi_m (\mathbf{I} - \tau \Omega \cdot \mathbf{e}) \cdot \mathbf{H} \quad (1)$$

Maxwell의 자장방정식

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M} \quad (4)$$

연속방정식

$$\nabla^* \cdot \mathbf{v}^* = 0 \quad (5)$$

연속방정식

$$\frac{\partial \mathbf{v}^*}{\partial t^*} + (\mathbf{v}^* \cdot \nabla^*) \mathbf{v}^* = -\nabla^* p^* \quad (6)$$

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

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

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

에너지방정식

$$\frac{dT^*}{dt^*} = \frac{1}{C_p^* Pe} \nabla^* \cdot (\kappa^* \nabla^* T^*) \quad (7)$$

자화의 구성방정식

$$\mathbf{M}^* = \frac{M_o^*}{H^*} (\mathbf{H}^* - Pe_r A_1 \mathbf{H}^* \times \omega^*) \quad (8)$$

여기서,  $\mathbf{M}$ 은 자화 벡터,  $\chi_m$ 은 자화율,  $\mathbf{I}$ 는 Idemfactor,  $\tau$ 는 유체마찰에 의한 회전운동의 완화시간,  $\Omega$ 는 내부미립자의 평균 각속도,  $\mathbf{e}$ 는 3계교대텐서,  $\mathbf{H}$ 는 자장 벡터,  $\mathbf{B}$ 는 자속밀도 벡터,  $\mu_0$ 는 진공중의 투자율,  $p$ 는 압력,  $Re$ 는 Reynolds 수,  $\eta$ 는 점성계수,  $\varepsilon$ 는 극성효과 변수 (Parameter),  $\sigma$ 는 자성효과 변수(Parameter) 및  $Pe_r$ 은 회전 Peclet 수,  $M_o$ 는 평형자화의 세기이다. 또한,  $A_1 = \tau^* \eta_1^* / (\eta_1^* + \sigma H^* M_o^* \tau^*)$ ,  $\tau$ 는 회전운동의 완화시간,  $\eta_1$ 는 와점성계수,  $\omega$ 는 유체의 회전각속도벡터,  $Gr$ 은 Grashof 수,  $\beta$ 는 체적팽창계수,  $T$ 는 온도,  $g$ 는 중력가속도 방향의 단위벡터,  $C_p$ 는 정압비열,  $Pe$ 는

Peclet 수,  $\kappa$ 는 열전도율이다. 본 연구에서 사용한 평균 Nusselt 수는 식 (9)을 이용하였다.

$$\overline{Nu} = \frac{\int_0^L Nu dx}{L} \quad (9)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 자성유체의 유동 특성

먼저 자성유체의 특성은 자장을 인가하지 않은 무자장의 경우와 자장을 인가한 2가지 경우에 대하여 나누어서 생각해 볼 수 있다. Ryu는 외부자장을 인가하지 않은 무자장의 경우 뉴턴유체와 자성유체의 열-유동 현상을 비교하였다. 일반적으로 자성유체는 무자장의 경우에는 뉴턴유체와 유사한 유동특성을 보이지만 자장이 인가되면 자장의 세기 및 방향에 따라 다양한 열-유동 현상을 나타내게 된다[10]. 즉, 인가자장이 없는 경우에 자성유체의 열-유동 현상은 온도 차이에 의한 밀도차와 중력이 원인이 된다. 그러나 자장을 인가하게 되면 인가자장 방향으로 자기체적력이 나타나기 때문에 자성유체의 자연대류 현상은 온도차에 의한 부력과 함께 자기체적력의 영향을 고려해야 한다[11]. 이와 같이 특성을 고찰하기 위하여 외부에서 자장을 인가할 경우 자성유체의 열-유동 현상이 인가조건에 따라 어떻게 변화하였는지에 대한 연구를 수행할 필요가 있다.

Fig. 2은 정방형관내에 시간경과에 따른 자성유체의 등온선도 변화를 나타낸다. 인가시간의 경과에 따라 자성유체의 열-유동 특성은 정방형관내 전체로 확산되었으며, 4000초가 경과한 경우 등온선도는 열확산이 정방형관내 전체로 발달되었고 이후 시간이 더 경과하여도 등온선도 형상의 큰 변화를 일어나지 않아 본 연구에는 이 지점을 정상상태로 간주하였다.

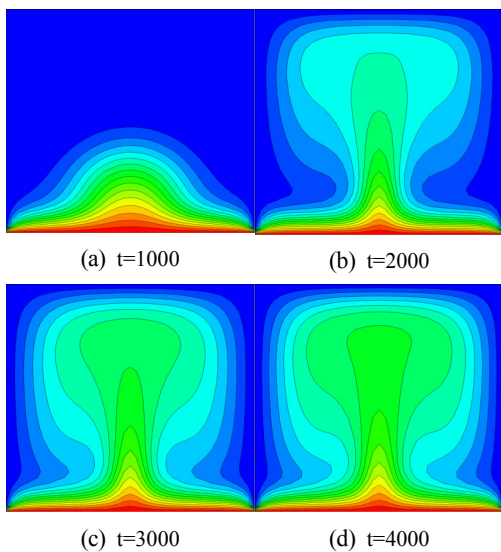
##### 3.1.1 등온선도(Isotherms)

Figs. 3과 4는 밀폐된 정방형관내에서 인가자장의 변화에 따른 자성유체의 등온선도 변화를 나타낸다. 여기서 무자장의 경우는 0 ( $H=0$ )으로 나타내었고, 아랫면에서의 인가자장은 +값( $H>0$ )으로 나타내었으며 윗면에서의 인가자장은 -값 ( $H<0$ )으로 나타내었다. 앞서 언급하였듯이, 밀폐된 정방형관내에서 무자장의 경우에는 자성유체의 열-유동 현상은 온도차에 기인한 밀도차이에 의해서만 발생되지만 자성유체에 자장을 인가할 경우 인가자장에 의하여 자성유체의 입자에 자기체적력이 추가적으로 발생하게 된다. 즉 인가자장에 의한 자기체적력은 자성유체

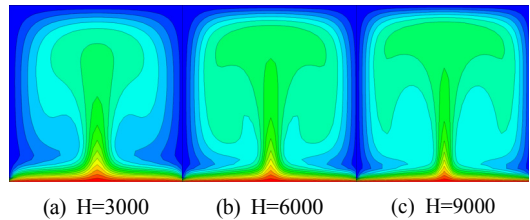
내부의 밀도차를 변화시켜 자성유체의 열-유동 특성을 변화시키는 원동력이 된다. 또한, Blums et al. (1997)에 의하면 자화는 온도에 반비례하고 자기체적력에 비례하므로, 자성유체에 자장을 인가할 경우 저온영역의 자기체적력이 고온영역보다 크게 된다[12]. 즉 인가자장이 증가할수록 저온영역과 고온영역의 밀도차는 상대적으로 더 커지게 되며 이로 인하여 밀폐된 정방형관내에서 인가자장의 세기 및 방향에 따라 자성유체의 열-유동 현상이 변화하게 되는 것이다.

Fig. 3은 밀폐된 정방형관내에서 아랫면에 인가자장을 가한 경우 2000초에서 인가자장 세기에 따른 자성유체의 등온선도 변화를 나타낸다. 이 경우 자성유체의 열-유동은 인가자장 세기가 증가할수록 더욱 활발하였다. 이러한 이유로는 인가자장에 의하여 자성유체 입자에 자기체적력이 작용함으로써 정방형관 하부의 고온영역보다 상부의 저온영역이 상대적으로 밀도가 커졌기 때문이다. 따라서 자성유체의 저온영역은 자장인가 방향인 아랫면으로 정렬되고 하부의 고온유체는 저온유체와의 밀도차 증가로 인한 부력에 의하여 상부로 향하여 열전달 현상이 활발하게 된다.

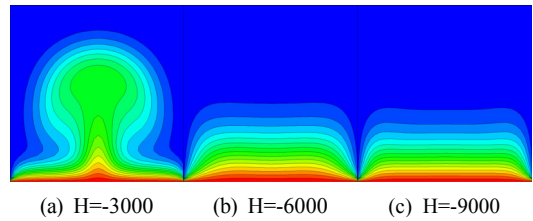
Fig. 4는 밀폐된 정방형관내에서 윗면에 인가자장을 가한 경우 2000초에서 인가자장 세기에 따른 자성유체의 등온선도 변화를 나타낸다. Fig. 4의 등온선도 변화는 Fig. 3의 결과와 반대 경향을 나타내고 있으며, 정방형관 윗면에 인가자장을 가한 경우 아랫면의 고온영역이 정방형관내 상부까지 확산되지 않기 때문에 인가자장이 증가할수록 열확산 억제 현상이 뚜렷하게 나타나게 된다.



[Fig. 2] Isotherms of magnetic fluid with time



[Fig. 3] Isotherms of magnetic fluid with variation of magnetic fields at  $t=2000$



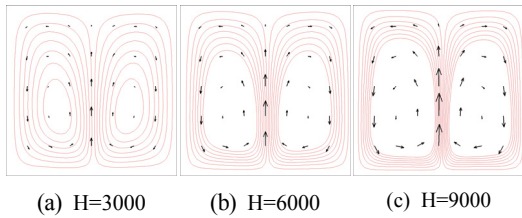
[Fig. 4] Isotherms of magnetic fluid with variation of magnetic fields at  $t=2000$

이러한 이유로는 정방형관에서 열전달이 시작되는 고온면(아랫면)의 반대방향인 윗면에서 인가자장이 가해지기 때문이다. 즉 고온영역 반대방향(윗면)에서 인가자장 세기가 증가할수록 상부에 위치한 저온영역에서 작용하는 자기체적력은 정방형관 상부로 정렬하게 되며 자기체적력이 증가하게 된다. 또한, Figs. 4의 (b), (c)와 같이 인가자장이 증가 될 경우 자장유체의 등온선도의 고온영역 크기는 감소하였다.

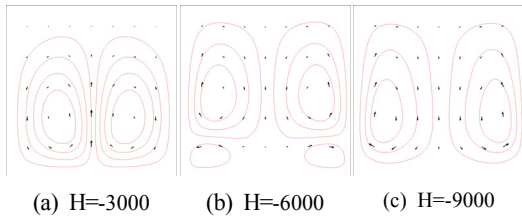
이상의 결과로부터 밀폐된 정방형관내에서 자성유체는 인가자장의 세기 및 방향에 따라 열전달 흐름이 변화하는 것을 알 수 있으며, 이러한 특성을 이용하여 자성유체의 열-유동 특성을 제어할 수 있게 된다. 이러한 자성유체의 특성은 열관리 시스템에서 작동유체로 자성유체를 사용할 경우에 열-유동 특성을 외부의 인가자장으로 제어할 수 있게 된다[13].

### 3.1.2 유선도(Streamlines)

Fig. 5는 밀폐된 정방형관내에서 아랫방향으로 자장을 인가하였을 경우( $H>0$ ) 인가자장 세기에 따른 자성유체의 유선도 변화를 나타낸다. 아랫방향에 인가자장이 증가할수록 고온으로 유지되는 아랫면 중심부( $X=0.5$ )에서는 위로 상승하는 속도벡터가 증가하고, 아랫면 좌우측면 근방에서는 인가자장이 증가할수록 고온으로 유지되는 아랫면 중심부( $X=0.5$ )에서는 위로 상승하는 속도벡터가 증가하고, 아랫면 좌우측면 근방에서는 아래로 하강하는 속도벡터가 증가하여 자연대류현상이 더욱 활발해짐을 알 수



[Fig. 5] Streamlines with various positive magnetic fields at  $t=4000$



[Fig. 6] Streamlines with various negative magnetic fields at  $t=4000$

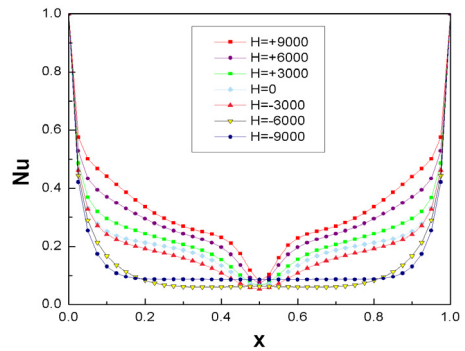
있다. 이것은 정방형관내에서 아랫방향으로 인가자장이 증가할수록 고온면 중심부에서 유체의 열-유동 속도가 수직방향으로 증가하고 좌우측면 부근에서 다시 하강하는 속도가 증가하기 때문이다.

Fig. 6은 밀폐된 정방형관내에서 윗방향으로 자장을 인가하였을 경우( $H<0$ ) 인가자장 세기에 따른 자성유체의 유선도 변화를 나타낸다. 윗방향에 인가자장을 증가 할 경우 주어진 조건에서 자성유체의 자연대류 현상이 억제 되어 자성유체는 정방형관내에 좌우측면에서는 상승하고 중심부에서는 하강하는 경향으로 변화하게 되었다.

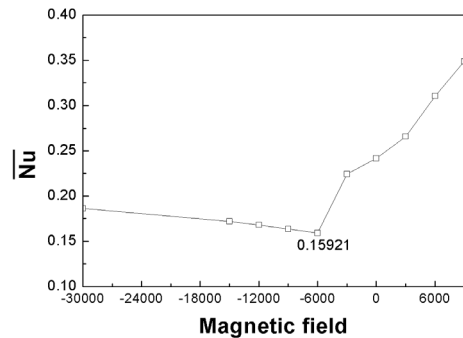
즉 일반적인 자연대류현상과 반대의 경향을 나타나게 되었다. 또한, 인가자장이 증가할수록 대칭되는 좌우측면 두 개의 유선도들의 중심점은 좌우측면에 가깝게 이동하면서 좌우측면에 가까운 유선도 사이의 간격이 좁아지게 됨을 알 수 있었다.

### 3.2 Nusselt numbers

Fig. 7은 밀폐된 정방형관내에서 아랫면과 윗면에 자장을 인가할 경우,  $Y=0.025$ 지점에서 인가자장 세기에 따른 자성유체의 국소 Nusselt 수를 나타낸다. 정방형관내에서 아랫면으로 인가자장을 증가하였을 경우( $H>0$ ) 아랫면의  $X=0.5$ 지점에서 Nusselt 수가 최소가 되었고 윗면으로 인가자장을 증가시켰을 경우( $H<0$ )  $X=0.2$  지점 및  $0.8$  영역 근처에서 최소 Nusselt 수가 나타났다.



[Fig. 7] Local Nusselt number in X-axis with various magnetic fields at  $t=4000$  and  $Y=0.025$



[Fig. 8] Average Nusselt numbers of magnetic fluid with various magnetic fields at  $t=4000$  and  $Y=0.025$

Fig. 8은 밀폐된 정방형관내에서 아랫면과 윗면에 자장을 인가하였을 경우,  $Y=0.025$ 지점에서 인가자장 세기에 따른 자성유체의 평균 Nusselt 수를 나타낸다. 평균 Nusselt 수가 최소가 되는 자장의 세기를 기준으로 인가자장 방향에 관계없이 인가자장 세기가 증가할수록 평균 Nusselt 수는 증가하였다. 평균 Nusselt 수는 인가자장  $H=-6000$ 에서  $0.15921$ 로 최소가 되었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 밀폐된 정방형관내에서 인가자장의 세기 및 방향에 따른 자성유체의 열-유동 특성에 대하여 이론적으로 고찰하였다. 자성유체의 지배방정식은 일반적인 자연대류의 지배방정식 함께 강자성체 미립자의 내부 회전을 고려한 자화의 구성방정식 및 자장방정식을 고려하였고, GSMAC법을 이용하여 수치해석을 진행하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 더불어 수치 해석적 방법을 통하여 얻은 결과들에 대한 실질적인 검증을 위하여 실험을 진행할 계획이다.

1. 인가자장 세기 및 방향에 따라 자성유체의 열전달 흐름이 변화하였고, 4000초에서 열전달 흐름은 정상상태가 되었다.
2. 아랫면이 고온으로 유지될 때 정방형관내 아랫방향으로 자장을 인가하였을 경우 자성유체의 열-유동 현상이 촉진되었고, 윗방향으로 자장을 인가하였을 경우 자성유체의 열-유동 현상은 억제되었다.
3. 자성유체의 유선도에서 아랫방향으로 인가자장이 증가할수록 자연대류현상이 활발하였고, 윗방향으로 인가자장이 증가할수록 자연대류현상은 억제되었다.
4. 정방형관내 자장이 수직방향으로 인가될 경우 인가자장  $H=6000$ 에서 평균 Nusselt 수 0.15921로 최소가 되었으며 인가자장이 증가할수록 평균 Nusselt 수는 증가하였다.

## References

- [1] K. S. Hwang, "Mechanism on Flow and Convective Heat Transfer of Nanofluids using Numerical and Experimental Method", Ph. D. Thesis, Korea Aerospace University, 2011.
- [2] S. S. Papell, "Magnetic Fluid Readily Controlled in Zero Gravity Environment", NASA Tech Brief, Brief 65-10335, 1965.
- [3] S. O. Ryu, J. W. Park and L. S. Seo, "A Study on the Flow Analysis for Natural Convection of Magnetic Fluid in a Cubic Cavity", Proc. of the KSME Spring Conference, Vol. 1, No. 5, pp.142-147, 2001.
- [4] H. Okanaga, K. Shizawa, N. Yashima and T. Tanahashi, "Numerical Analysis of Magnetic Fluid Flow in a Square Cavity : GSMAC Finite Element Method of Magnetic Fluid", Trans. of the JSME (B), Vol. 53, No. 492, pp.2414-2422, 1987.
- [5] S. H. Jin, "A Numerical Analysis on the Characteristic Benard Flow and control of Magnetic Fluid", Master Thesis, Dong-A University, 2001.
- [6] J. W. Park, S. H. Jin, C. H. Jun and L. S. Seo, Y. S. Kim, "Numerical Analysis on the Heat Transfer Characteristics of Benard Flow in a Magnetic Fluids", Journal of The Korean Magnetics Society, Vol. 13, No. 1, pp.41-46, 2003.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2003.13.1.041>
- [7] T. Tanahashi, T. Sawada, K. Shizawa and T. Ando, "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, 1983.
- [8] H. Kawai, Y. Katoh, T. Sawada and T. Tanahashi, "GSMAC-FEM for Incompressible Viscous Flow Analysis(A Modified GSMAC Method)", JSME International Journal, Series II, Vol. 33, No. 1, pp.17-25, 1990.
- [9] 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 University, 2002.
- [10] S. O. Ryu, "A Study on the Flow Analysis for Natural Convection of Magnetic Fluid in a Cubic Cavity", Ph.D. Thesis, Dong-A University, 2001.
- [11] S. J. Cha, "A Study on Heat Transfer Characteristics of Magnetic Fluids in a Cubic Cavity" Master Thesis, Dong-A University, 2000.
- [12] E. Blums, A. Cebers and M. M. Maiorov, "Magnetic Fluids", pp.289-341, de Gruyter, 1997.
- [13] J. H. Seo, M. Y. Lee and L. S. Seo, "A Study of Natural Convection of Magnetic Fluid in a Cubic Cavity", Trans. of the KSME (B), In Review.

### 서재형(Jae-Hyeong Seo)

[정회원]



- 2009년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학사)
- 2011년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 (공학박사과정)

<관심분야>

친환경 자동차 열관리, 열/물질 전달, 나노유체

### 이무연(Moo-Yeon Lee)

[정회원]



- 2010년 2월 : 고려대학교 기계공학부 (공학박사)
- 2011년 1월 : 고려대학교 기계공학과 (연구교수)
- 2011년 2월 ~ 2012년 8월 : 자동차부품 연구원 선임연구원
- 2012년 9월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

친환경 자동차 열관리, 전동식 히트펌프, 신재생에너지 변환시스템, 열/물질전달, 연료전지, 나노유체, 자성유체