

반원관내 자성유체의 유동에 관한 연구

황성욱 · 박정우 · 서이수*

동아대학교 기계공학과, 부산시 사하구 하단동 840, 동아대학교, 604-714

(2007년 10월 18일 받음, 2007년 12월 14일 최종수정본 받음)

본 연구에서는 밀폐된 반원관내 자성유체의 자연대류 현상을 수치적으로 연구하였다. 수치해석방법은 Siliomis의 GSMAC법을 이용하였다. 자성유체의 자연대류 현상을 수치 해석적으로 규명하여, 자성유체의 열역학적 특성을 연구하고자 하였다. 특히 열전달 해석방법으로 온도분포 및 고온벽면의 Nusselt 수를 통하여 속도 벡터와 함께 고찰 하였다. 이로 인하여, 외부 자장에 의한 세기는 자연대류 현상을 촉진 또는 억제하므로, 열전달 문제에 있어서 열의 제거에 있어서 효과적인 방법을 찾게 되었다.

주제어 : 자장, 자성유체, 자연대류, 열전달, Nusselt 수

I. 서 론

자성유체(magnetic fluids)는 금속특유의 강자성체와 유체특유의 유동특성을 함께 갖는 유체로서 겉보기에 유체 자신이 자기력에 반응하는 것처럼 거동하는 인공적으로 만들어진 일종의 고액혼상유체이다[1].

자성유체를 균일 또는 불균일 자장 하에 두면 유체 내에 자기력이 작용한다. 자성유체의 비극성이론에 의하면 자기력은 체적력으로 외견상 중력과 같은 효과를 가진다[2]. 따라서 외부에서 자성유체에 가한 자장구배의 방향이나 크기를 다르게 설정하면서 유체내의 일부를 가열하면, 보통의 유체와 다른 유동특성을 보이게 된다. 또한 공학적 응용으로 유체의 유속이 느리고, 표면과 주위 유체와의 밀도 차가 커서 부력의 영향을 무시할 수 없는 밀집형 열 교환기, 스핀트랜지스터, 초전도, 반도체 및 원자로의 냉각장치 등 복잡한 형상의 기계 내에 발생하는 열전달 문제에 있어서 열의 제거에 효과적인 새로운 방법이 첨단기술과의 관계를 더욱 부각시켜주는 중요한 부문이기 때문에 보다 밀도 있는 연구가 필요하다.

자성유체의 자연대류에 관한 연구가 최근에 시작되고 있다. Polovin[3] 등은 자장이 베나드(Benard)유동에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. Poppelwell[4] 등은 자성유체의 열전도율을 측정하였고, Park[5] 등은 수직자장하에서 원관내 자성유체의 유동특성을 연구한 바 있으나 자성유체의 열역학적 성질과 열전도, 대류에 관한 심도 있는 연구가 되어 있지 않은 상태이다.

본 연구에서는 반원관내의 자성유체를 대상으로 자장을 인가한 경우에 나타나는 자연대류현상을 파악하는데 그 목적을 둔다. 수치해석에 있어서 자성유체의 입자회전을 고려한 극성

유체이론의 志澤·棚橋[6]의 식을 이용하여, 해법으로는 棚橋·濟藤이 제안한 GSMAC(Generalized Simplified Marker and Cell)유한요소법을 이용했고[7-9]. 무차원인자 자장의 방향 및 세기에 따라 고찰하였다.

II. 본 론

1. 지배방정식

본 연구에서는 내부회전을 고려한 비전도성 자성유체의 지배방정식계를 사용하였고, 다음과 같이 나타낼 수 있다:

▶ 연속방정식

$$\nabla^* \cdot \mathbf{v}^* = 0 \tag{1}$$

▶ 운동량방정식

$$\rho \frac{d\mathbf{v}^*}{dt^*} = \nabla^* \cdot \mathbf{T} + \rho \mathbf{b} \tag{2}$$

▶ 각운동량방정식

$$\rho \frac{d\mathbf{s}^*}{dt^*} = \nabla^* \cdot \boldsymbol{\Lambda} + \mathbf{e} : \mathbf{T} + \rho \mathbf{l} \tag{3}$$

▶ 에너지방정식

$$\rho \frac{du^*}{dt^*} = -\nabla^* \cdot \mathbf{q} + \rho r + \mathbf{T}_\theta : \mathbf{d} \tag{4}$$

▶ 자화의 완화방정식

$$\mathbf{M}^* = \chi_m (\mathbf{H}^* + \tau^* \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{H}^*) \tag{5}$$

▶ Maxwell의 자장방정식

$$\nabla^* \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{6}$$

$$\nabla^* \times \mathbf{H}^* = 0 \tag{7}$$

*Tel: (051) 200-7647, E-mail: lsseo@dau.ac.kr

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

여기서, \mathbf{T} 는 전응력텐서, \mathbf{b} 는 단위 질량당 외력, \mathbf{s} 는 단위질량당 내부 각운동량, $\mathbf{\Lambda}$ 는 우응력 텐서, \mathbf{e} 는 3계 교대텐서, \mathbf{l} 은 단위 질량당 체적우력, \mathbf{u} 는 단위질량당 내부에너지, \mathbf{q} 는 열유속 벡터, \mathbf{r} 는 단위 질량당 열원의 강도, \mathbf{T}_0 는 유체의 응력텐서, \mathbf{d} 는 변형속도텐서, \mathbf{M}^* 는 자화 벡터, χ_m 은 자화율, \mathbf{H}^* 는 자장 벡터, τ^* 는 유체마찰에 의한 회전운동의 완화시간, $\mathbf{\Omega}$ 는 입자의 각속도 벡터, \mathbf{B} 는 자속밀도 벡터, μ_0 는 진공중의 투자율이다.

2. 자성유체의 물성치 및 해석모델

본 연구에서의 작동유체는 Water base 자성유체(Ferricoloid W-40)를 대상으로 하였다. Table I은 수치해석에 사용된 작동유체의 물성치를 나타낸 것으로 神山 등[10]에 의하여 측정된 것을 일부 사용하였다. 여기서 자성유체의 비열, 체적팽창계수 및 열전도율에 관해서는 모액의 물성치를 이용한다.

수치해석에서 해석모델은 사각형과 원관의 특징을 함께 가지고 있는 반원관으로서 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 41×41의 균일격자를 사용하였다. 온도조건은 하부(Y=0)를 가열벽면(25 °C)으로 하고 반원의 외부를 냉각벽면(20 °C)으로 설정하였다. 또한 반원의 경계에서 위쪽에 위치한 격자점에 대해서는 냉각벽면과 같은 고정경계조건으로 하였다. 수치해석에서 정상상태는 각 격자점의 무차원 온도가 전 시간 step의

Table I. Properties of magnetic fluid (Ferricoloid W-40).

| (20 °C 기준) | |
|---|---|
| Effectiveness Radius of Particle (a_m) | 10 [nm] |
| Density of Magnetic Fluid (ρ) | 1.37×10^3 [kg/m ³] |
| Density of Particle (ρ_p) | 5.16×10^3 [kg/m ³] |
| Volume Concentration of Particle (ϕ_v) | 8.68×10^{-2} |
| Number of Particle per Volume (N) | 1.25×10^{23} [개/m ³] |
| Mean the Moment of Inertia per Volume (I) | 1.1×10^{-14} |
| Eddy Viscosity of Particle (η_1^*) | 2.18×10^{-3} [Pa · s] |
| Viscosity of Magnetic Fluid (η^*) | 1.06×10^{-2} [Pa · s] |
| Magnetization of Particle (M_s) | 0.36 [Wb/m ²] |

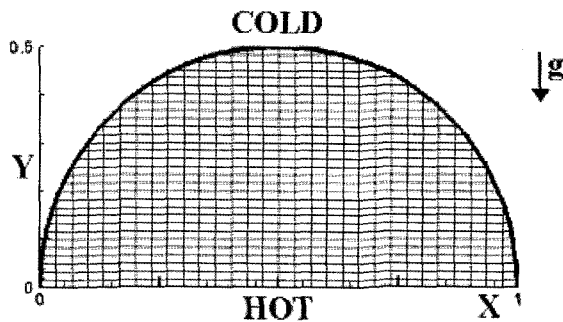


Fig. 1. Analytical model.

계산결과와 비교하여 0.0001 이하가 되는 시점으로 하였다.

본 해석에서는 이상의 해석모델에 대하여 志澤 등이 제안한 극성이론에 관한 지배방정식 개념을 적용 하였고, 극성유체로서 극성효과 파라미터는 神山의 실험[10]에 따라서 0.21로 하였다.

3. 수치해석결과 및 고찰

본 연구에서 무차원 자장은 印加방향인 중력과 같은 방향일 경우 +로 나타내었고, 중력과 반대 방향일 경우 -로 나타내었다.

Fig. 2는 자장을 가하지 않은 경우 무차원 시간경과에 따른 등온선도를 나타낸 것으로, 고온영역이 X=0.25와 X=0.75지점에서 발달하여 위쪽으로 진행되는 것을 볼 수 있다. 또한, Fig. 3은 시간경과에 따른 속도벡터를 나타낸 것으로 X=0.25지점과 X=0.75 지점을 중심으로 반시계 및 시계방향으로 대류현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 보통의 뉴턴유체의 자연대류현상과 같다고 할 수 있다. 즉 자성유체는 자장을 가하지 않으면 뉴턴유체와 같은 유동을 한다.

Fig. 4은 중력방향으로 무차원 자장을 3000을 인가한 경우의 등온선도이다. 우선 Fig. 2)와 비교해보면 고온영역이 좌우로 이동하여 X=0.15와 X=0.85에서 발달하여 위쪽으로 진행되는 것을 알 수 있다. Fig. 5에서 본 바와 같이 좌우 코너에서 작은渦 그리고 X=0.3과 X=0.7을 중심으로 커다란渦가 발생하고 유체의 유동방향은 시계 또는 반시계방향으로 작용함을 볼 수 있다.

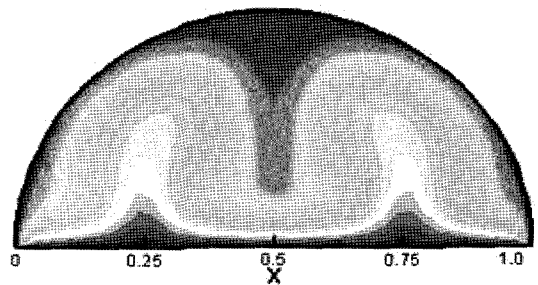


Fig. 2. Isotherms at H = 1.

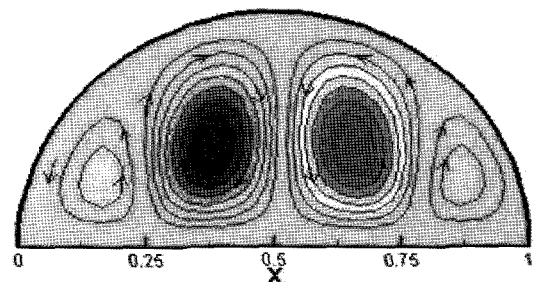


Fig. 3. Streamlines and Vectors at H = 1.

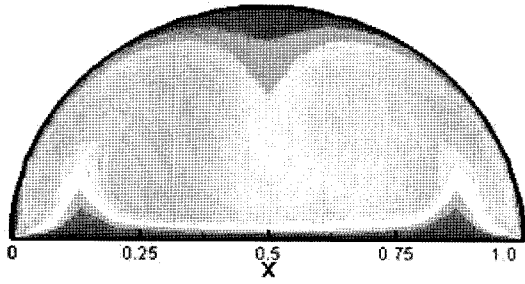


Fig. 4. Isotherms at $H = 3000$.

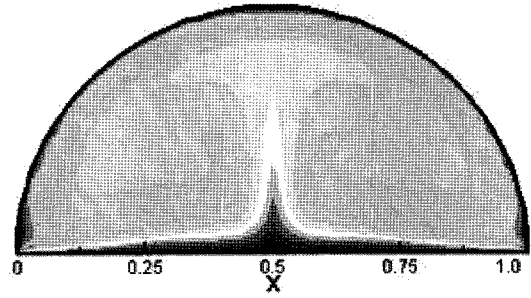


Fig. 8. Isotherms at $H = 9000$.

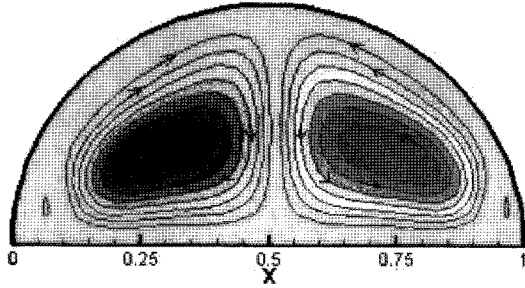


Fig. 5. Streamlines and Vectors at $H = 3000$.

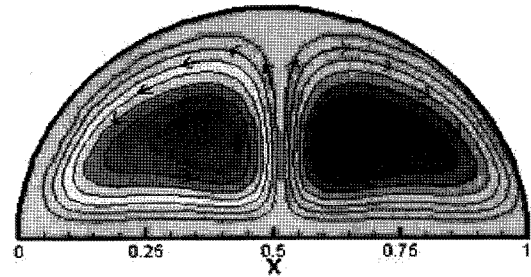


Fig. 9. Streamlines and Vectors at $H = 9000$.

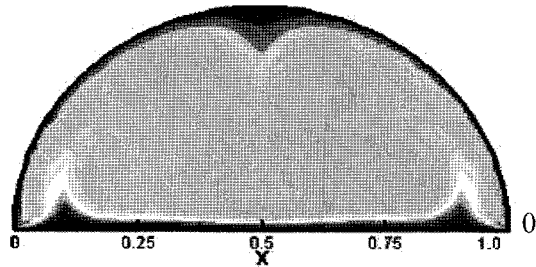


Fig. 6. Isotherms at $H = 6000$.

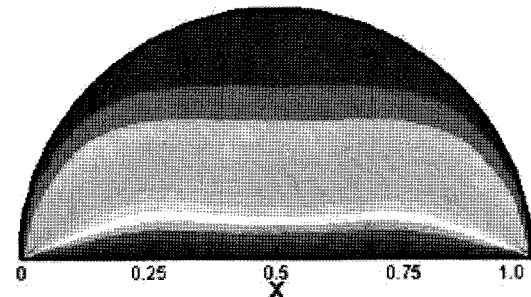


Fig. 10. Isotherms at $H = -3000$.

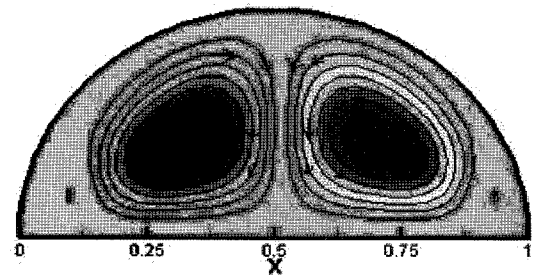


Fig. 7. Streamlines and Vectors at $H = 6000$.

Fig. 6과 Fig. 7은 $H = 6000$ 에서 나타낸 것으로 의 고온영역이 $X = 0.1$ 과 $X = 0.9$ 인 지점에서 발달하여 상승하는 것을 볼 수 있고, $X = 0.5$ 인 지점에서 저온영역이 하강한 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 5와 비교해 보면 유동은 2차 와류가 존재하지 않고 해석영역 전체적으로 2개의 와류에 의해 지배됨을 알 수 있다. 좌우 코너에 이것은 자장의 영향으로 해석모

델 내의 상하부의 밀도차가 크게 되고, 고온 영역이 좌우 벽 쪽으로 더욱 이동하면서 회전 영역이 확대되기 때문이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 $H = 9000$ 의 강력한 자장을 중력방향으로 인가한 상태이다. 고온 영역은 좌우에서 중심 $X = 0.5$ 로 이동하여 위쪽으로 발달하여 진행되는 것을 볼 수 있다. 이것은 다음과 같다. Fig. 5와 Fig. 7을 보면 $H = 3000$ 일 경우 해석영역 전체를 지배하는 두 와류의 크기가 $H = 6000$ 이 되면 감소한 것을 볼 수 있고, 자장의 세기가 더 크게 되면渦는 더욱 작아지게 된다. 또한 $H = 9000$ 이 되면 Fig. 5와 Fig. 7의 $X = 0.05$ 와 $X = 0.95$ 지점의 2차 와류가 발달하여 전체 유동장을 지배하게 되고 그 영향으로 Fig. 9에서 보는 바와 같이 커다란渦가 회전방향이 Fig. 5와 Fig. 7의 와류와 반대방향으로 바뀌어 좌우로 고온 영역을 넓혀 나가는 것을 알 수 있다.

즉, 본 연구의 해석모델 내 자성유체 유동은 중력과 같은

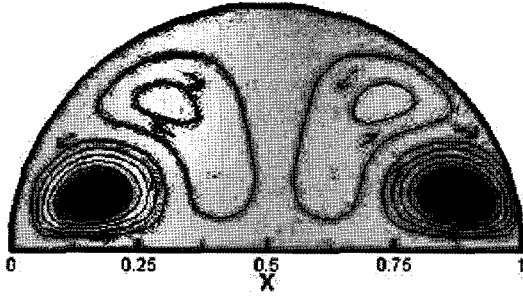


Fig. 11. Streamlines and Vectors at $H = -3000$.

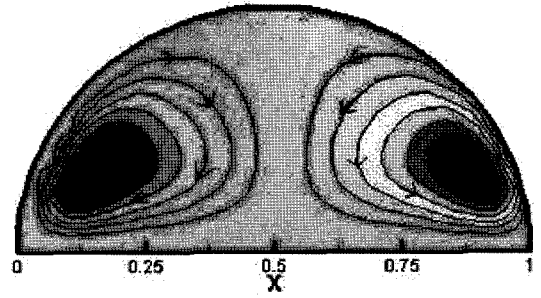


Fig. 15. Streamlines and Vectors at $H = -9000$.

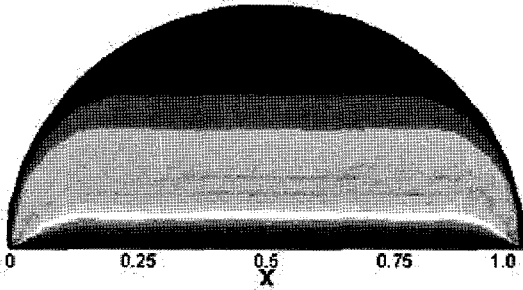


Fig. 12. Isotherms at $H = -6000$.

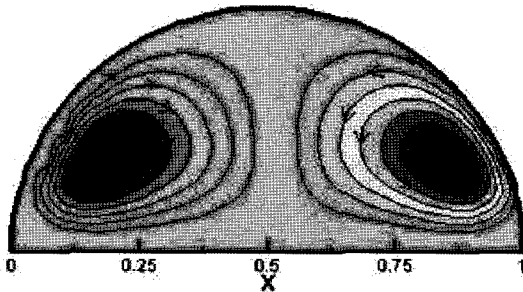


Fig. 13. Streamlines and Vectors at $H = -6000$.

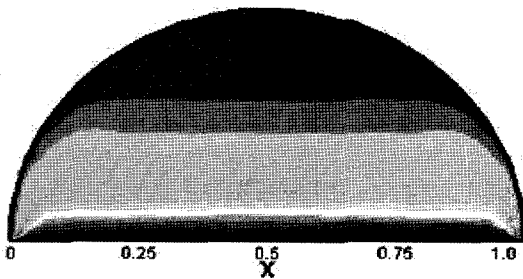


Fig. 14. Isotherms at $H = -9000$.

방향의 자장인가에 대해서 뉴턴유체보다 대류가 더 활발하게 진행되는 것을 나타낸다. 이는 인가자장의 영향으로 해석모델 상하의 밀도차가 증가했기 때문이고, 마치 Gr수가 증가한 경우와 같이 가열과 냉각 온도 차이가 증가한 것과 같은 대류 현상을 나타내고 있다.

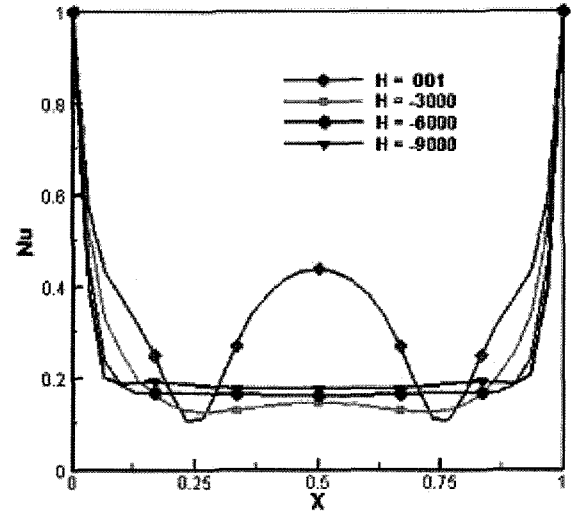


Fig. 16. Local Nusselt number versus for various magnetic intensities.

Fig. 10에서 Fig. 15는 중력과 반대방향으로 무차원 자장을 인가한 경우의 등온선도와 流線圖이다. 좌우 벽면을 제외하고 고온 영역이 자장의 증가에 따라 균일하게 발달하여 감을 알 수 있다. 그림에서 印加磁場을 $H = -3000$ 에서 $H = -6000$, $H = -9000$ 으로 증가함에 따라 균일영역이 Fig. 10의 0.25 지점에서 0.75지점 내에 있으나, 자장의 증가에 따라 0.1에서 0.9 영역으로 점차 확대되어 가는 형상을 보여주고 있다. 따라서 중력과 반대방향으로 강력한 자장을 인가하면, 반원 형상에 대한 일반적인 자연대류현상은 없어지고 평행평판 사이의 대류현상으로 변하여 가는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 강력한 자장에 의하여 전도에 의한 열전달이 다소 진행된 것이라 할 수 있다.

Fig. 16과 Fig. 17은 가열벽면에서 인가자장의 강도에 따라 국소 Nusselt 수를 비교한 것이다. $H = 1$ 인 경우는 Benard 유동에서 볼 수 있는 열전달 현상을 볼 수 있고, 좌우 벽면과 중앙에서 열전달이 활발히 진행됨을 볼 수 있다. 또한 $X = 0.25$, $X = 0.75$ 지점에서는 열유동이 둔화되어 Nu수가 낮게 된다. 중력과 역방향으로 강한 자장을 걸면, $H = -3000$, -6000 , -9000 에서 본 바와 같이 좌우 코너를 제외하곤, 열이

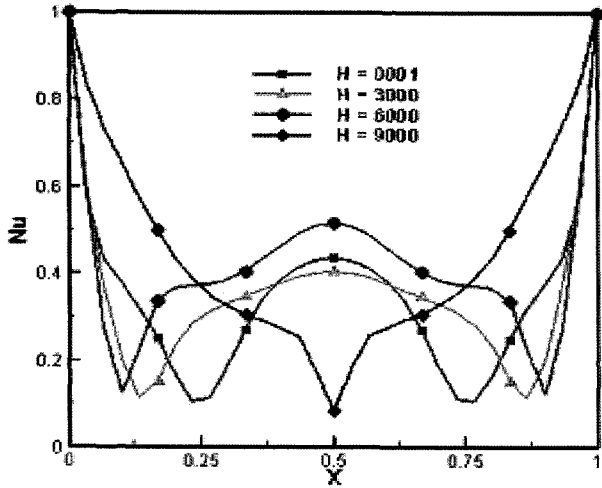


Fig. 17. Local Nusselt number versus for various magnetic intensities.

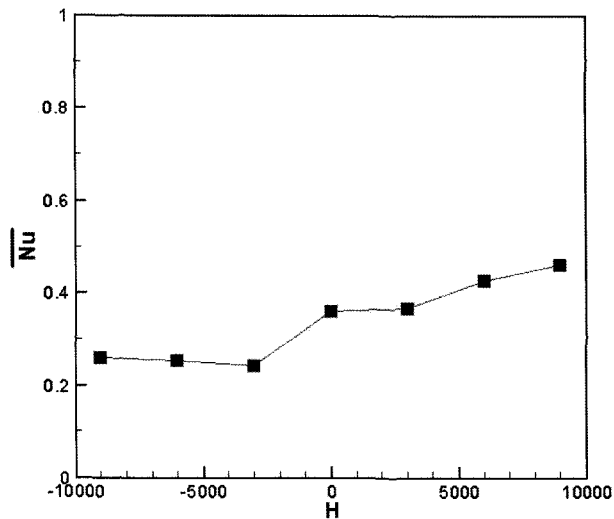


Fig. 18. Mean Nusselt number versus for various magnetic intensities.

균일하게 정체되어 뉴셀트 수가 대체로 낮게 나타나고 있다.

Fig. 17은 중력방향으로 인가자장을 증가 시킬 때 Nusselt 분포를 나타낸 것이다. $H=1$ 에서 $H=3000, 6000$ 으로 증가되었을 때, $X=0.25, X=0.75$ 에서 Nusselt 수가 증가함을 알 수 있다. $H=9000$ 인 경우 $X=0.5$ 부근에서 강력한 인가 자장의 영향으로 고온이 집중되어 열전달이 매우 둔화됨을 알 수 있다.

Fig. 18은 인가자장의 강도를 증가시켰을 때 평균 Nu 수를 비교한 것이다. 유형의 형태가 바뀌어지는 임계자장 $H=-3000$ 을 중심으로 +방향으로 인가자장을 증가시키었더니 평균 Nu수가 증가하였으며, -방향으로 증가시키었더니 완만히 증가 되었다. 따라서 인가자장의 증가는 방향에 관계없이 변곡점을 중심으로 평균 Nu가 증가 되었다.

Fig. 19은 인가자장이 중력방향에 대한 $X=0.25$ 지점에서 Y축을 따라 속도성분을 관찰하고자 한 그림이다 $Y=0.2$ 이하

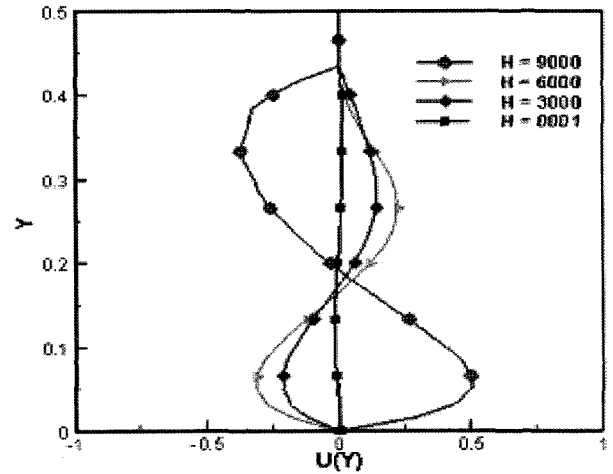


Fig. 19. Velocity distributions for various magnetic intensities.

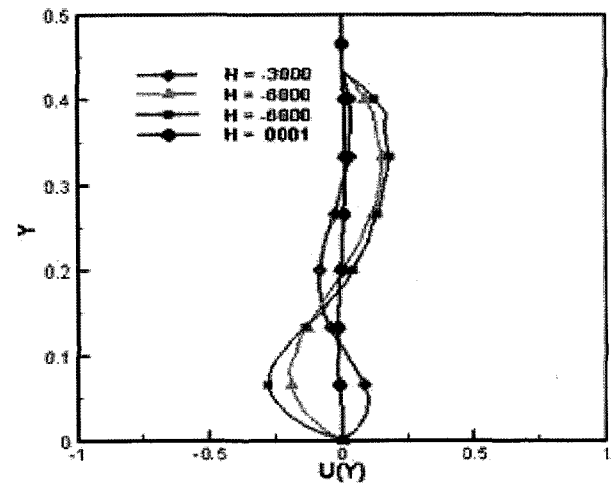


Fig. 20. Velocity distributions for various magnetic intensities.

에서는 $H=1, H=3000, H=6000$ 로 증가시킬 때 음의 방향으로 증가하고 $Y=0.2$ 이상에서는 양의 방향으로 증가함을 알 수 있다. 또한 $H=9000$ 에서는 강력한 대류현상이 나타나 유동의 형상이 반대 방향으로 회전하게 되어 속도 성분도 0.2 이하에서는 양의 방향, 0.2 이상에서는 음의 방향으로 변하는 것을 보여 주고 있다. 이와 같은 현상은 유동의 진행 방향이 회전하기 때문이다.

Fig. 20은 인가자장이 중력과 반대 방향으로 작용할 때 $X=0.25$ 지점에서 Y축을 따라 속도성분을 관찰하고자 한 그림이다. $Y=0.18$ 이하에서는 양의 값으로 증가하다가 음의 방향으로 바뀌어지고 있다. 이는渦의 회전 방향이 어느 방향으로 돌게 되는가가 관건이 된다. $Y=0.18$ 이상에서는 양의 값으로 커지고, $H=1$ 의 경우에 $X=0.25$ 와 0.75 에서 고온 영역이 존재하여 상부 쪽으로 전진하기 때문에 별다른 속도 변화가 없게 된다.

III. 결 론

참고문헌

- 1. 자성유체유동에서 중력과 같은 방향의 인가자장의 영향은 대류현상을 더 활발하게 진행되었다. 이는 마치 Gr수가 증가한 경우와 같은 대류현상을 나타내었다.
- 2. 자성유체유동에서 중력과 반대 방향의 인가자장의 영향은 대류현상을 억제하여 마치 Gr수가 감소한 경우와 같고, 그 세기에 따라 전도에 의해 열전달이 다소 진행되고 대류현상은 거의 나타나지 않는다.
- 3. 자성유체의 열유동은 인가자장의 증가에 따라 열전달이 활발히 진행되어 Nusselt 수가 증가하고, 음의 방향으로 인가자장을 증가시키면, 유동이 둔화되어 Nusselt 수는 변곡점을 중심으로 완만히 증가되었다.
- 4. 자성유체의 유동은 외부의 인가자장에 의해 일반적인 뉴턴유체에서 생각할 수 없는 자연대류의 제어를 가능하게 하고, 이는 방열 및 단열에 대한 획기적인 제안이 될 것이라 기대된다.

- [1] 日本機械學會, 機能性流体·知能流体, コロナ社, 日本 (2001), pp. 1~30.
- [2] 고재귀, 송재만, 자성물리학의 기초와 응용, 숭실대학교 출판부, 한국 (1997), pp. 256~287.
- [3] R. V. Polovin, Fundamentals of Magnetohydrodynamics, Consultants Bureau, New York (1990), pp. 1~10.
- [4] J. Popplewell and S. W. Charles, J. Phys., **12**, 2499 (1982).
- [5] J. W. Park and L. S. Seo, KSME, **23**(1), 25 (1999).
- [6] 志澤一之, JSME, **51**(468), 2737 (1985).
- [7] 棚橋隆彦, 電磁熱流体の數値解析, 森北出版株式會社, 日本 (1995), pp. 53~62.
- [8] 棚橋隆彦, GSMAC-FEM數値流体力學の基礎とその應用, アイピーシー, 日本 (1991), pp. 157~214.
- [9] 棚橋隆彦, 流れの有限要素法解析 I, 朝倉書館, 日本 (1997), pp. 75~80.
- [10] 神山新一, JSME, **61**(581), 157 (1995).

감사의 글

본 논문은 2005년도 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

A Study on the Flow Behavior of Magnetic Fluids in a Closed-semicircular Pipe

Sung-Wok Hang, Joung-Woo Park, and Lee-Soo Seo*

Department of Mechanical Engineering, Donga University, Hadan 840, Saha-gu, BuSan 604-714, Korea

(Received 18 October 2007, in final form 14 December 2007)

In this study, an analysis of natural convection of magnetic fluids in a closed-semicircular pipe was performed by the numerical methods. For the numerical method GSMAC method of Siliomis is used. From the results of numerical methods it is verified that the natural convection of the magnetic fluid, I investigated the nature convection phenomenon of the magnetic fluid with numerical analysis and was going to study the thermodynamic characteristic of the magnetic fluid. Because the effect of magnetic field control natural convection, we needed to find effective method to eliminate heat in the cure of heat transfer.

Keywords : magnetic field, magnetic fluids, natural convection, heat transfer, nusselt number