

밀폐공간내 자성유체의 유동특성에 관한 연구

유신오* · 박정우** · 서이수***

A Study on the Flow Analysis for Natural Convection of Magnetic Fluid in a Cubic Cavity

Shin-Oh Ryu, Joung-Woo Park and Lee-Soo Seo

Key Words: Natural convection(자연대류), magnetic fluid(자성유체), GSMAC algorithm, magnetic field(자장), Thermo-sensitive liquid crystal film(감온액정)

Abstract

Natural convection of a magnetic fluid is different from that of Newtonian fluids because magnetic body force exists in an addition to gravity and buoyancy. In this paper, natural convection of a magnetic fluids(W-40) in a cubic cavity is examined by numerical and experimental method. One side wall was kept at a constant temperature(25°C), and the opposite side wall was also held at a constant but lower temperature(20°C). Under above conditions, various magnitudes of the magnetic fields were applied up. GSMAC scheme is used for a numerical method, and the thermo-sensitive liquid crystal film(R20C5A) is utilized in order to visualize wall-temperature distributions as an experimental method. This study has resulted in the following fact that the natural convection of a magnetic fluids is controlled by the direction and intensity of the magnetic fields.

기호설명

M_0 : 평형자화의 세기
 Pe_r : 회전 Peclet 수
 b : 단위질량당 체적력벡터
 q : 열유속밀도벡터
 A : 우응력텐서
 Ω : 입자의 회전각속도벡터
 β : 체적팽창계수
 ϵ : Levi-civita의 기호
 τ_B : 브라운운동에 의한 완화시간
 η : 전단점성계수
 η_0 : 모액의 전단점성계수

η_1 : 와점성계수
 η_2 : 제2점성계수
 μ_0 : 진공의 투자율
 χ_m : 자화율

1. 서론

자성유체(magnetic fluids)는 금속특유의 강자성체와 유체특유의 유동특성을 함께 갖는 유체로, 콜로이드 크기의 자철광, 철, 니켈 등과 같은 강자성 미립자에 계면활성제로 특수한 표면처리를 하여 물이나 케로신 등의 액상 중에 안전하게 분산시킨 콜로이드(colloid)상태의 현탁액(suspension)이며, 원심력이나 자장을 가하여도 액상과 고상의 분리가 일어나지 않고 겔보기에 액상 자신이 강한 자성을 갖는 것처럼 거동하는 인공적으로 만들어진 일종의 고액혼상유체이다⁽¹⁾.

* 회원, 삼척산업대학교 기계공학과
 ** 회원, 동아대학교 기계공학과 대학원
 *** 회원, 동아대학교 기계공학과

자성유체는 강자성머립자의 표면처리로 오레인 산 등의 계면활성제를 첨가하여 분산성이 매우 좋아 침강이 일어나지 않고, 보통의 원심분리기나, 중력 및 외부자장의 작용 등에 의해서도 이 특성은 없어지지 않으며, 분산입자와 모액의 분리는 물론 분산입자 농도에도 변화를 주지 않는다. 이러한 이유로 자성유체는 외견상으로 자기분극에 의한 힘을 나타내는 것 이외에는 거의 뉴턴유체와 같은 유체로서의 거동을 보인다⁽²⁾.

공학적 응용으로 유체의 유속이 느리고, 표면과 주위 유체와의 밀도 차가 커서 부력의 영향을 무시할 수 없는 밀집형 열 교환기, 반도체 및 원자로의 냉각장치 등 복잡한 형상의 기계 내에 발생하는 열전달 문제에 있어서 열의 제거에 효과적인 새로운 방법이 자성유체제조법의 연구와 함께 중요한 부분으로 성장하리라 생각된다⁽³⁾.

따라서, 본 연구에서는 자장이 자성유체의 자연대류에 미치는 영향으로, 기본적인 이차원 유동인 정방형 Cavity내에 있어서 실험대상의 작동 유체는 자성유체로하고, 인가자장의 방향과 세기에 따라 자연대류 현상의 변화 및 전열 유동 특성을 수치해석하고 실험을 통해 비교한다.

수치해석의 지배방정식계로서는 유체 내부의 자유도를 고려한 극성유체이론의 志澤·棚橋의 식을 이용하며, 해법으로는 차분법과 같은 정도의 고속, 저용량 해법이고, 경계조건도 비교적 용이하게 도입할 수 있고, 또 복잡한 형상문제에도 적용할 수 있는 棚橋·濟藤이 제안한 GSMAC 유한요소법^(4,5)을 이용한다.

2. 지배방정식

여기서는 내부회전을 고려한 전도성 자성유체의 지배방정식계에 가정으로 비전도성, 인가자장이 없고 또한 준정상자장을 적용해서 얻어지는 비전도성 자성유체의 지배방정식을 이용한다.

연속방정식

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

운동방정식

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

각운동량방정식

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

에너지방정식

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

자화의 구성방정식

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

자장의 방정식

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

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

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

이다. 응력텐서 \mathbf{T} 는

$$\mathbf{T} = -p \mathbf{I} + \mathbf{T}^{(v)} + \mathbf{T}^{(M)} \text{-----}(9)$$

로 나타낼 수 있고, $\mathbf{T}^{(v)}$, $\mathbf{T}^{(M)}$ 은 각각 응력텐서의 점성부분과 Maxwell 응력텐서로 다음과 같다.

$$\mathbf{T}^{(v)} = \eta_2 (t \cdot r \mathbf{D}) \mathbf{I} + 2\eta \mathbf{D} + 2\eta_1 \mathbf{e} \cdot (\boldsymbol{\omega} - \mathbf{Q}) \text{--}(10)$$

$$\mathbf{T}^{(M)} = \mathbf{B}\mathbf{H} - \mu_0 H^2 \mathbf{I} / 2 \text{-----}(11)$$

본 연구에서 가정으로 Boussinesq 근사[(1)밀도의 변화는 단순히 온도의 변화에 의해서 근사된다. (2)연속방정식에 있어서 밀도의 변화는 무시할 수 있다.]를 적용한다. 또한, 본 연구에 사용된 나머지 가정을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 벽면에서 유체는 미끄러지지 않는다.
 - 2) 작용하는 외력은 중력만이다.
 - 3) 유기자장은 인가자장에 비해서 충분히 작은 것으로 무시한다.
 - 4) 유체의 물성치는 온도만의 함수로 한다.
 - 5) 화학반응 등에 대한 내부발열은 없다.
 - 6) 복사에 의한 전열은 없다.
 - 7) 자성유체는 비극성이다.
 - 8) 체적우력은 없다.
 - 9) 열전도율은 등방성이다.
 - 10) 자장 \mathbf{H} 는 항상 \mathbf{Q} 와 직교한다.
 - 11) 유속이 그다지 빠르지 않으므로 에너지방정식의 압력변화 항, 산일함수의 항은 무시한다.
- 이상의 가정을 지배방정식에 적용하여 무차원화 하면 각운동량방정식과 자화의 구성방정식은 연립하여 정리할 수 있다. 즉, 지배방정식계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^* \cdot \mathbf{v}^* = 0 \text{-----}(12)$$

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

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{Re} (\nabla^* \cdot (\eta^* \nabla^* v^*) + \nabla^* \cdot (\eta^* v^* \nabla^* \cdot)) \\
& + \frac{4 \epsilon \sigma}{Re Pe_r} M^* \cdot \nabla^* H^* \\
& - \frac{2 \epsilon}{Re} \nabla^* \times (\sigma H^* M_o^* A_1 \omega^*) \\
& + \frac{Gr}{Re^2} \beta^* T^* e \text{-----(13)}
\end{aligned}$$

$$\frac{dT^*}{dt^*} = \frac{1}{C_p^* Pe} \nabla^* \cdot (x^* \nabla^* T^*) \text{-----(14)}$$

$$M^* = \frac{M_o^*}{H^*} (H^* - Pe_r A_1 H^* \times \omega^*) \text{-----(15)}$$

단, $A_1 = \tau^* \eta_1^* / (\eta_1^* + \sigma H^* M_o^* \tau^*)$ 이고, e 는 중력 가속도 방향의 단위벡터로, (-y)방향을 취하고 있기 때문에, $e_1 = 0$, $e_2 = -1$ 이다.

3. 경계조건

수치해석에 있어서 mesh는 20×20의 균일격자로 하였고, 경계조건은 Fig. 1에 표시하였다. 경계조건을 보면 좌측(AD 선상)은 가열벽면, 우측(BC 선상)은 냉각벽면이고, 上下(DC와 AB 선상)벽면은 단열벽면이다.

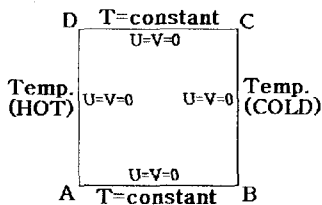
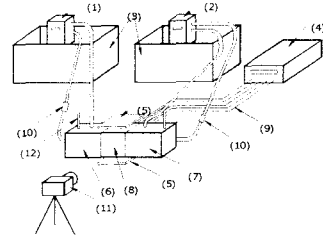


Fig. 1 Boundary condition

속도의 경계조건으로서는 모든 벽면에서 no-slip조건을 도입한다. 또한, Ra가 높게 되면 Euler적 시간적분법에서는 절단오차에 기인하는 음의 확산효과 현상이 본래 가지고 있는 확산효과를 상회하는 해를 일으키기 쉽게 됨으로 2차 정도의 계산을 했다. 자성유체의 속도 및 온도의 경계조건은 뉴턴유체의 경우와 거의 같다. 그러나 자성유체의 경우 인가자장의 방향에 따라 그 성향이 뉴턴유체의 경우와 다르게 나타나는 경우도 있다. 본 연구에서는 연직상향으로 일정한 자장구배를 인가한 경우에 대한 수치해석을 했다.

4. 실험장치 및 방법



- (1) Circulator(hot side) (2) Circulator(cold side)
- (3) Temperature control units
- (4) Analysis record (5) Permanent magnet
- (6) Thermostat(hot side) (7) Thermostat (cold side)
- (8) Thermo-sensitive liquid crystal film
- (9) Thermocouples(K type) (10) Control valve
- (11) Digital camera (12) Thermometer

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

Fig. 2은 실험장치의 개략도이다. 실험에 사용된 유체는 Water Base W-40을 이용하였다. 가열부의 물 공급을 제어하기 위해 제어변을 이용하였다. 가열부의 온도 손실여부를 확인하기 위하여 열전대를 삽입하여 이를 확인했다. 측정부는 한 변 50 mm의 입방체 Cavity를 이용했다. 마주보는 두 벽면을 고온벽면과 저온벽면으로 하였다. 고온 및 저온의 벽면에는 열전도계수가 큰 두께 0.2 mm의 동판을 이용했다. 그 외의 벽면에서는 두께 10 mm의 투명아크릴 판을 이용했다. 또한, 2차원 Cavity에 있어서 내부온도분포는 실험부 전방의 벽면온도분포로 알 수 있다. 즉, Cavity의 온도분포를 가시화하기 위해 감온액정을 실험부 전방의 벽면 내부에 부착한다. 영구자석의 자장의 세기는 Gauss meter로 측정하였다. 또한, 고온 및 저온벽면은 항온수 순환장치(Circulator)에 의해 고온수와 저온수를 각각 순환시켜 동판 전체에 온도를 각각 균일하게 가할 수 있다.

본 논문의 실험방법은 다음과 같다. 저온의 항온수 순환장치에 저온벽면온도(20℃)로 설정하고, 고온의 항온수 순환장치에 고온벽면온도(25℃)로 설정한 후, 약 10분 정도 순환시켜 저온 측의 항온조를 20℃로 유지시키고, 고온의 항온조를 25℃로 유지시킨다. 항온조의 온도가 저온의 벽면

온도와 고온의 벽면온도로 유지되면 밸브를 열어 실험을 개시한다.

Table 1 Experimental conditions

Condition	liquid	Strength	Direction
1	Magnetic fluid	20 mT	Up(↑)
2	Magnetic fluid	40 mT	Up(↑)

실험은 감온액정의 온도변화가 더 이상 일어나지 않는 시점까지 행한다. 감온액정의 변화는 디지털카메라를 이용하여 5분마다 촬영을 하였다. 작동유체로는 Water Base 자성유체로 하여 다음과 같은 조건으로 실험을 행하였다. 실험부에서 각 실험의 조건들은 Table 1과 같다. 자장은 영구 자석 (60 mm×60 mm×15 mm×3개)을 이용하여 자장을 가하고 자장의 크기는 실험부와 자석 사이의 거리로서 조정했다.

5. 결과 및 검토

Fig. 3와 Fig. 4는 무차원시간 $t=1200$ 일 때와 정상상태인 $t=3200$ 일 때, 무차원자장을 $H=-5000$, $H=-5500$, $H=-6000$, $H=-8000$ 으로 각각 다르게 걸었을 때 열유동현상을 나타낸 것으로, 중심 하부 쪽에서 고온영역이 발달되고 있다. 이처럼 자장을 상부에서 인가하면 중심하부에서 고온 영역이 발달하게 된다. 이는 인가자장이 열유동현상에 영향을 주기 때문이다. 상부에서 자장을 $H=-5000$, $H=-5500$ 을 가하면, 거의 외관상 무중력 상태가 되는 것처럼, 좌측의 고온벽에서 우측의 저온벽으로 열이 전파되는 현상과 같이[바닥면을 가열하고, 윗면을 냉각하고, 옆면을 단열한 것처럼] 고온부가 중앙부에서 발달하게 된다. 즉, 부력의 향과 자장의 향이 균형을 유지해서 자연대류는 일어나지 않게 된다. 이는 밀폐공간내에 자성유체가 자기장의 영향을 받아 유체입자가 자장의 인가방향으로 정렬하게 되기 때문이다. 따라서 내부유동을 외부에서 제어가 가능하게 된다. 따라서, 중력가속도 방향과 반대로 자장구배를 인가한 경우, 먼저 극성에 의한 외관상 점도의 증가에 더해져 자기력이 중력의 반대방향으로 작용하기 때문에 외관상의 중력벡터의 크기가 작게 되고 유동속도가 다시 감소되어 외관상의

Rayleigh 수가 작아짐을 알 수 있다.

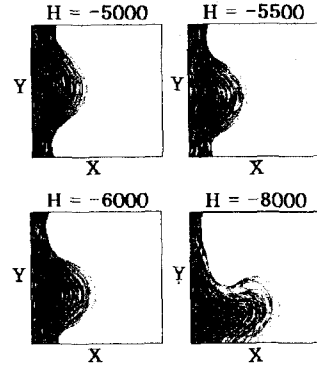


Fig. 3 Isotherms for various magnetic intensities at $t=1200$

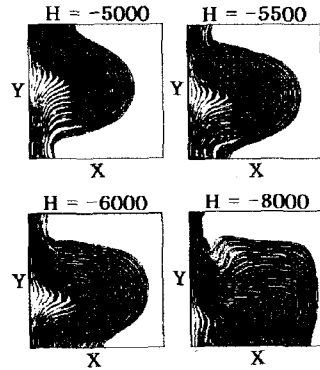


Fig. 4 Isotherms for various magnetic intensities at $t=3200$

Fig. 5와 Fig. 6은 자장을 해석모델의 상부에서 각각 $H=-5000$, $H=-5500$, $H=-6000$, $H=-8000$ 으로 인가할 때 무차원시간 $t=1200$, $t=3200$ 에 대한 유선분포를 나타낸 것이다. 이는 고온 영역이 가열 벽면 상부에서 차츰 내려와 하부로 이동하는 것을 보여주고 있다. 인가자장이 $H=-5000$ 일 때, 두 개의 셀이 발생하여 회전하는 것을 보여주고 있다. 아래쪽의 회전 반경이 큰 것은 고온 영역이 중심보다 약간 위에서 머물고 있기 때문이고 시간이 지날수록 이 현상은 뚜렷하다. 그러나, Fig. 5는 $H=-5500$ 일 때 유동현상을 나타낸 것을 보면, 위에 있는 셀의 크기가 아래에 있는 셀보다 크지만, Fig. 6에서는 그 크기가 비슷하다. 이것은 초

기에 찬 유체가 상부에서 활발하게 움직이다가 시간이 지남에 따라 열이 확산되면서 안정된 흐름이 유지되기 때문이며, 즉 흐름은 상하 대칭적으로 회전하는 모양을 나타낸다.

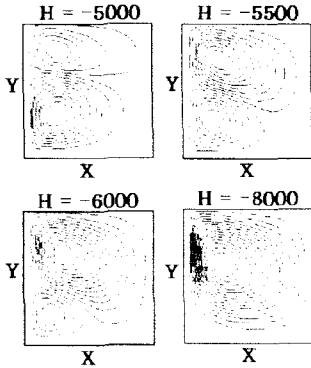


Fig. 5 Streamlines for magnetic intensities at $t=1200$

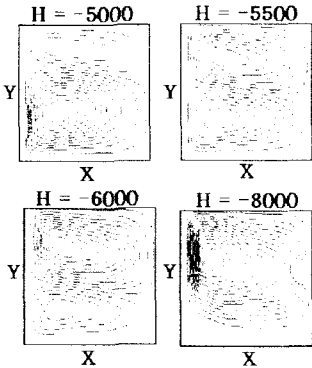


Fig. 6 Streamlines for magnetic intensities at $t=3200$

또한, Fig. 5의 $H=-6000$ 일 때를 보면 아래쪽에 작은 셀이 하나 존재하고 위쪽에는 큰 셀이 존재하고 있다. 그러다가 시간이 지남에 따라 안정된 흐름으로 유지되면서 작은 셀은 차츰 커지게 [Fig. 6] 된다. 그러나, Fig. 5의 $H=-8000$ 일 때는 자장이 커지면서 작은 셀은 사라지고 커다란 셀만 존재하게 되고, 셀의 중심도 실험부 중심보다 약간 위에 존재하게 된다. 이는 가열부 상부쪽에 찬 유체가 활발히 유동하고, 하부쪽에는 고온의 유체가 유동하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 인가자장이 $H=-5000$, $H=-5500$, $H=-6000$, $H=-8000$ 에 대해서 $X=0.5$ 인 지점에 대해서 실험부의 높이에 따른 X방향의 속도 성분 U 를 나타낸 것이다. 여기서 보면, $H=-5000$ 일 때보다 자장의 세기가 커질수록, 중심하부에서 고온부 형성은 저온벽면 쪽으로 더욱 강하게 이동하는 것을 볼 수 있고, 중심상부에서는 저온벽면에서 고온벽면 쪽으로 이동하게 된다. 특히, $H=-8000$ 의 경우는 속도 차가 매우 크게 나타나고 있다. 그러나, $t=3200$ 일 경우를 보면, 좌우 이동속도의 차가 줄어들고 있다. 이는 시간이 지남에 따라 더운 유체가 차츰 확산되어 온도차가 줄어들기 때문이다. 이로부터 속도의 감소율은 가한 자장의 크기, 방향, 구배 그리고 시간에 의해서도 변화하고 있는 것을 알 수 있다.

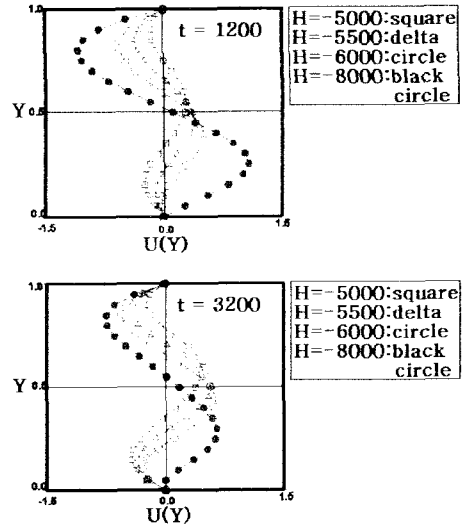


Fig. 7 Velocity distributions for various magnetic intensities

Fig. 8은 인가자장이 $H=-5000$, $H=-5500$, $H=-6000$, $H=-8000$ 에 대해서 $Y=0.5$ 인 지점에 대해서 횡방향으로 Y방향의 속도 성분 V 를 나타낸 것이다. 여기서 보면, 벽면근방($X=0.25$)에서 $H=-5000$, $H=-5500$, $H=-6000$ 일 때는 양의 값, 즉 유체는 상승하고, $X=0.25$ 에서 저온벽면까지는 하강한다. $H=-8000$ 에서는 가열벽면근방에서 하강하는 유체가, $X=0.4$ 이상에서는 상승하는 유체가 존재한다. 따라서, 반시계방향으로 유체가 유동함을

알 수 있다.

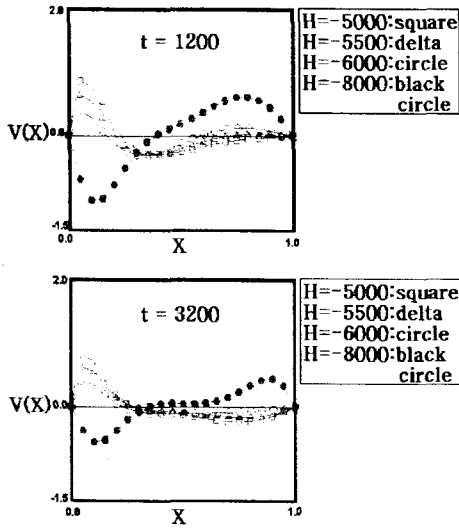


Fig. 8 Velocity distributions for various magnetic intensities

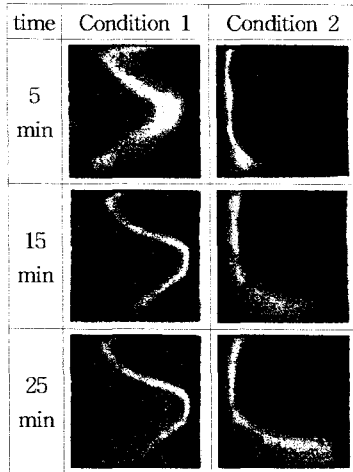


Fig. 9 The variation of temperature distributions with time

본 연구에서 실험한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 조건1은 인가자장의 방향이 중력과 역방향으로 20 mT가 인가된 경우이다. 특히 고온영역의 발달이 가열벽면 중앙 부분에서 시작되어 발달해 가는 것을 볼 수 있다. 이것은 자장의 영향으로 인해 외관상 중력의 방향이 실험부 하부에서 상

부로 향하게 되고 부력의 항과 자장의 항이 균형을 유지한 것이라 볼 수 있다. 조건2의 경우는 인가자장의 세기가 40mT인 경우로 외관상 중력이 중력과 반대방향으로 더 커짐에 따라서 저온영역이 실험부 상부에서 더욱 발달하고 고온영역은 가열벽면 하부에서 발달하는 것을 볼 수 있다.

여기서 보면 조건1과 조건2는 수치해석에서 (Fig. 4) H=-5500과 H=-8000의 경우와 거의 유사한 성향을 나타내고 있다. 그러나, 수치해석에서 인가한 무차원자장의 세기를 계산해 보면 다소 차이는 있다. 이것은 실험에 사용한 영구자석의 자장분포가 균일하지 못한점 때문이라 생각된다.

6. 결론

(1) 감온액정을 이용해 벽면의 온도분포를 가시화 함에 따라 인가자장이 자성유체의 자연대류에 미치는 영향을 정성적으로 파악할 수 있었다.

(2) 부력의 항과 자장의 항이 균형을 유지할 때에는 실험부의 중심에서 먼저 고온부의 발달이 있다.

(3) 연직상향의 일정한 자장구배를 가한 경우의 자성유체의 유동은 감속되고, 외관상의 Rayleigh 수도 감소하는 온도분포의 거동이 보인다.

(4) 외부에서 자성유체에 가하는 자장의 세기와 방향 및 구배에 따라 자성유체의 유동과 자연대류현상을 제어할 수 있음을 알았다.

참고문헌

- 1) L. S. Seo, 1990, "Propagation of surface waves of magnetic fluids in traveling magnetic fields", J. of M.M.M., 85, pp. 167~170.
- 2) J. W. Park and L. S. Seo, 1999, "A study on the flow behavior of magnetic fluids in a circular pipe with a vertical magnetic field", KSME, 23-1, pp. 25~32.
- 3) 武富, 1988, "磁性流体基礎と應用", 日刊工業新聞社, pp. 123~136.
- 4) 棚橋隆彦, 1991, "GSMAC-FEM數值流体力學の基礎とその應用", アイピーシー, pp. 525~863.
- 5) 棚橋隆彦, 1993, "CFD數值流体力學", アイピーシー, 1993, pp. 612~646.