

반원관내 자성유체의 자연대류에 관한 연구

황성욱[†] · 박정우* · 서이수**

A Study on the Flow Behavior of Magnetic Fluids in a half Circular Pipe

Sung-Wook Hwang[†], Jung-Woo Park*, Lee-Soo Seo**

Key Words: Thermo-sensitive liquid crystal film(감온액정 필름), Magnetic fields(자성유체), Magnetic force(자기력), Permanent magnet(영구자석).

Abstract

In this paper, natural convection of a magnetic fluids(W-40) in a half circular pipe enclosure are investigated by numerical and experimental method. One side wall is kept at a constant temperature(25℃), and the opposite side wall is also kept at a constant temperature(20℃). Under above conditions, various magnitudes of the magnetic fields were applied up. Theoretical study through the governing equation derived by Siliomis is carried out with numerical analysis by the GSMAC 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 are controlled by the direction and intensity of the magnetic fields.

기호설명

T : 전응력 텐서

b : 단위 질량당 외력

s : 단위질량당 내부 각운동량

Λ : 우응력 텐서

e : 3계 교대텐서

l : 단위 질량당 체적우력

u : 단위질량당 내부에너지

q : 열유속 벡터

r : 단위 질량당 열원의 강도

T_0 : 유체의 응력텐서

d : 변형속도텐서

M^* : 자화 벡터

χ_m : 자화율

H^* : 자장 벡터

τ^* : 유체마찰에 의한 회전운동의 완화시간

Ω : 입자의 각속도 벡터

B : 자속밀도 벡터

μ_0 : 진공중의 투자율

1. 서론

자성유체(magnetic fluids)는 금속특유의 강자성체와 유체특유의 유동특성을 함께 갖는 유체로 겉보기에 액상 자신이 강한 자성을 갖는 것처럼 거동하는 인공적으로 만들어진 일종의 고액혼상 유체이다1).

자성유체를 균일 또는 불균일 자장 하에 두면

† 동아대학교 기계공학부 석사과정
E-mail : sunguk365@hanmil.net
TEL : (051)200-6990

* 동아대학교 기계공학부 초빙교수

** 동아대학교 기계공학부 교수

유체 내에 자기력이 작용한다. 자성유체의 비극성이론에 의하면 자기력은 체적력으로 외견상 중력과 같은 효과를 가진다²⁾. 따라서 외부에서 자성유체에 가한 자장구배의 방향이나 크기를 다르게 설정하면서 유체내의 일부를 가열하면, 뉴턴 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, 스피트랜지스터, 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. Polovin³⁾ 등은 자장이 베나드(Benard) 액체에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. Poppelwell⁴⁾ 등은 자성유체의 열전도율을 측정하였고, Park⁵⁾ 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 극성유체이론의 志澤·棚橋⁶⁾의 식을 이용하여, 해법으로는 棚橋·濟藤이 제안한 GSMAC유한요소법을 이용했다^{7,8,9)}. 또한 실험은 감온액정(Thermo-sensitive liquid crystal) 필름을 이용하여 반원관 단면에 대한 온도분포를 가시화하여 수치해석결과와 비교하고자 한다.

2. 본 론

2.1 지배방정식

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

▶ 연속방정식

$$\nabla^* \cdot v^* = 0$$

▶ 운동량방정식

$$\rho \frac{dv^*}{dt^*} = \nabla^* \cdot T + \rho b$$

▶ 각운동량방정식

$$\rho \frac{ds^*}{dt^*} = \nabla^* \cdot \Lambda + e : T + \rho l$$

▶ 에너지방정식

$$\rho \frac{du}{dt^*} = -\nabla^* \cdot q + \rho r + T_0 : d$$

▶ 자화의 완화방정식

$$M^* = \chi_m (H^* + \tau^* \Omega \times H^*)$$

▶ Maxwell의 자장방정식

$$\nabla^* \cdot B = 0$$

$$\nabla^* \times H^* = 0$$

$$B = \mu_0 H^* + M^*$$

2.2 자성유체의 물성치 및 해석모델

본 연구에서의 작동유체는 Water base 자성유체(Ferricolloid W-40)를 대상으로 하였다. Table 1은 수치해석에 사용된 작동유체의 물성치를 나타낸 것으로 神山등¹⁰⁾에 의하여 측정된 것을 일부 사용하였다. 여기서 자성유체의 비열, 체적팽창계수 및 열전도율에 관해서는 모액의 물성치를 이용한다.

수치해석에서 해석모델은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 41×41의 균일격자를 사용하였다. 온도조건은 하부(Y=0)를 가열벽면(20℃)으로 하고 반원의 외부를 냉각벽면(15℃)으로 설정하였다. 또한 반원의 경계에서 위쪽에 위치한 격자점에 대해서는 냉각벽면과 같은 고정경계조건으로 하였다. 수치해석에서 정상상태는 각 격자점의 무차원 온도가 전 시간step의 계산결과와 비교하여 0.0001 이하가 되는 시점으로 하였다.

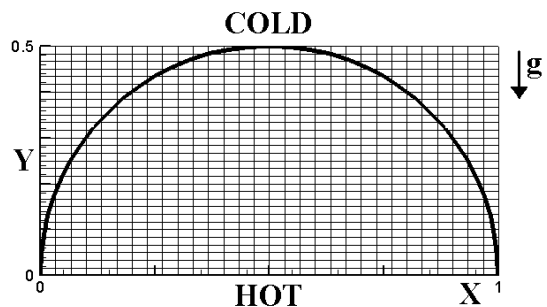


Fig. 1 Analytical model

Table 1 Properties of magnetic fluid(Ferricolloid W-40)

(20℃ 기준)

내부입자의 유효반경 (a_m)	10 [nm]
자성유체의 밀도(ρ)	1.37×10^3 [kg/m ³]
내부입자의 밀도(ρ_a)	5.16×10^3 [kg/m ³]
분산입자의 체적농도(ϕ_a)	8.68×10^{-2}
단위체적당 내부입자의 수(N)	1.25×10^{23} [개/m ³]
단위체적당 평균관성모멘트(I)	1.1×10^{-14}
분산입자의 와점성계수(η_a^*)	2.18×10^{-3} [Pa·s]
자성유체의 점성계수(η^*)	1.06×10^{-2} [Pa·s]
자성입자의 포화자화(M_s)	0.36 [Wb/m ²]

2.3 수치해석결과 및 고찰

본 연구에서 자장의 세기는 인가방향이 중력과 같은 방향일 경우 +로 나타내었고, 중력과 반대방향일 경우 -로 나타내었다.

Fig. 2는 자장을 가하지 않은 경우 무차원 시간 경과에 따른 등온선도를 나타낸 것으로, 고온영역이 X=0.5지점에서 발달하여 위쪽으로 진행되는 것을 볼 수 있다. 또한, Fig. 3은 시간경과에 따른 속도벡터를 나타낸 것으로 X=0.25지점과 X=0.75지점을 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 5000을 인가한 경우의 등온선도이다. 우선 Fig. 4(a)는 대류의 진행초기로서 Fig. 2(a)와 비교해보면 고온영역의 상승영역이 다소 감소한 것을 볼 수 있다. 또한 정상상태를 보면(Fig. 3(d)) 고온영역이 X=0.25와 X=0.75인 지점에서 발달하여 상승하는 것을 볼 수 있고, X=0.5인 지점에서 저온영역이 Y=0.1인 지점까지 하강한 것을 볼 수 있다. 이것은 자장의 영향으로 해석모델내의 상하부의 밀도차가 크게 되고, 가열과 냉각에 대한 전열면적의 차이에 따라 고온영역의 상승에 비해 저온영역의 하강이 더 지배적이기 때문이라 생각된다. 또한 Fig. 5는 Fig. 4의 조건에 대한 속도벡터를 나타낸 것이다. 그림에서 t=4000(Fig. 5(b))일 경우에는 좌우에 위치한 셀의 중심이 약 X=1.5 및 X=8.5지점에 위치한 것을 볼 수 있고, t=6000(Fig. 5(c))일 경우는 약 X=3.5 및 X=6.5지점에서 시계방향 및 반시

계방향의 셀이 나타난 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 4(c)에 나타난 바와같이 X=0.5지점에서 저온영역의 하강기류를 잘 나타나기 때문이다. 그리고 Fig. 3과 Fig. 5를 비교하여 보면 시간이 경과함에 따라 속도벡터의 크기가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 즉, 본 연구의 해석모델내 자성유체유동은 중력과 같은 방향의 자장인가에 대해서 뉴턴유체보다 대류가 더 활발하게 진행되는 것을 나타낸다. 이는 인가자장의 영향으로 해석모델 상하의 밀도차가 증가했기 때문이고, 마치 Gr수가 증가한 경우와 같이 가열과 냉각온도차이가 증가한 것과 같은 대류현상을 나타내고 있다.

Fig. 6는 중력과 반대방향으로 무차원 자장을 인가한 경우의 등온선도이다. 그림에서 무차원 시간이 경과함에 따라 가열벽면 전체적으로 고온영역이 Y=0.2정도 상승한 것을 볼 수 있고, Fig. 2와 비교해보면 진행이 더 느린 것을 볼 수 있다. Fig. 7은 Fig. 6의 조건일 경우 속도벡터를 나타낸 것으로, 시간 진행에 따라 속도가 거의 0일 것을 볼 수 있다. 이는 가열과 냉각으로 인한 해

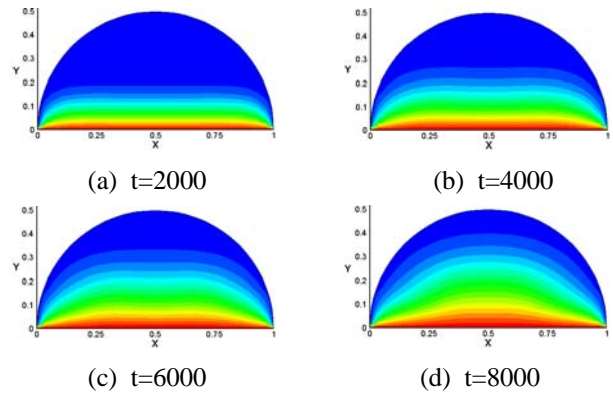


Fig. 2 Isotherms for time at H=0

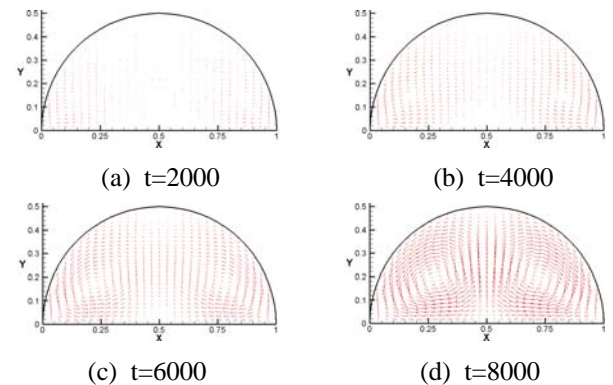
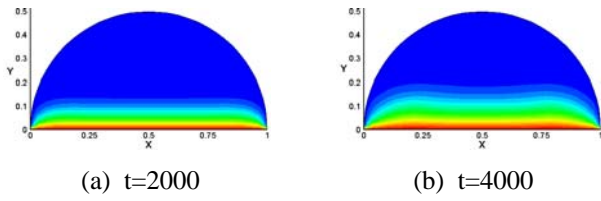
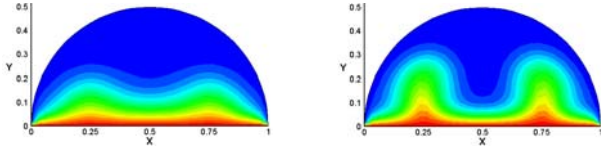


Fig. 3 Velocity vector at H=0



(a) t=2000

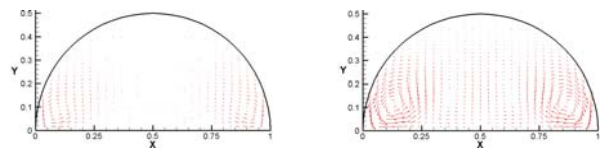
(b) t=4000



(c) t=6000

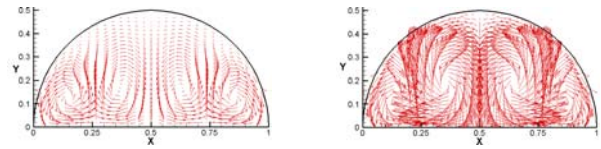
(d) t=8000

Fig. 4 Isotherms for time at H=5000



(a) t=2000

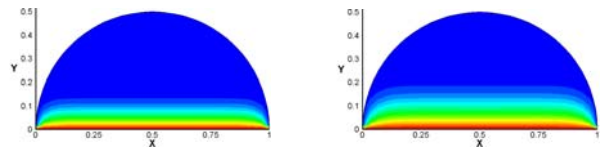
(b) t=4000



(c) t=6000

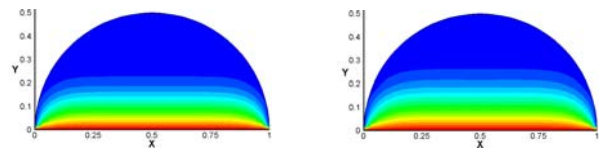
(d) t=8000

Fig. 5 Velocity vector at H=5000



(a) t=2000

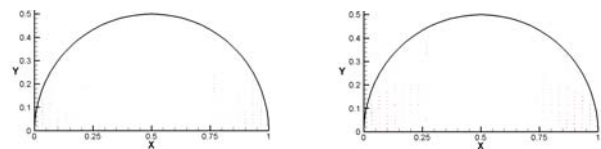
(b) t=4000



(c) t=6000

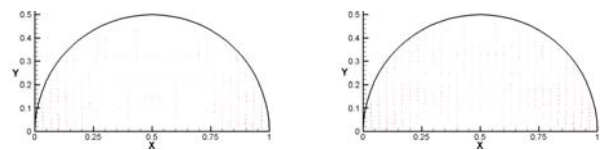
(d) t=8000

Fig. 6 Isotherms for time at H=-5000



(a) t=2000

(b) t=4000



(c) t=6000

(d) t=8000

Fig. 7 Velocity vector at H=-5000

석모델내 상하의 밀도차가 중력과 반대방향으로 인가된 자장의 영향으로 인하여 거의 소멸한 것이기 때문이다. 즉 이 경우는 전도에 의해 열전달이 다소 진행되고 대류현상은 거의 나타나지 않는다.

2.4 실험장치

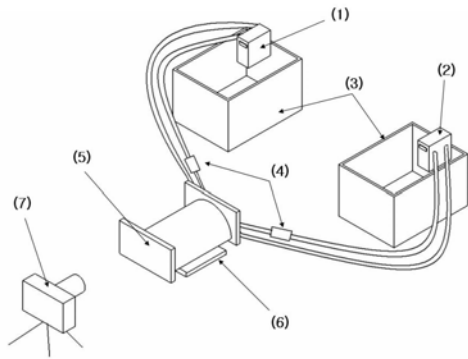
Fig. 8과 Fig. 9는 실험장치를 나타낸 것이다. 실험에서 사용된 자성유체는 Water base W-40을 사용하였다. 반원관에서 바닥면은 고온벽면으로 하고 외부 반원관은 저온벽면으로 설정하였다. 고온의 온도설정은 바닥면과 접하는 직사각형 공간을 만들었고, 저온의 온도설정은 반원관 외부에 직경이 큰 또 하나의 반원관을 실험부에 장착하여 두 대의 침수 전열기(Immersion Circulation, WBC-18E)를 통해 각각 가열된 물을 순환시킴으로서 균일하게 하였다.

실험모델은 열전달율이 좋은 상용동관(C2700)을 사용하였고, 제품의 규격 및 검사체적을 고려하여 내경이 50 mm인 것을 사용하였다. 실험부의 전방과 후방은 작동유체와 물의 유출을 방지하기 위해 동관과 동관 사이를 용접하였다. 실험부 내에 공기가 유입을 방지하기 위해서 실험장치의 뒷부분을 약 1 mm 높게 하였고 작동유체의 유입구를 실험장치 뒤쪽에 만들었다.

자성유체는 불투명하므로 이를 가시화하기 위해서 감온액정(Thermo-sensitive liquid crystal film, R20C5WA)을 실험부 전방에 부착하였고, 반응온도는 20°C~25°C로 온도에 따라 빨강, 노랑, 초록, 푸른색으로 변화한다. 실험에서 자장의 인가는 웨라이트자석(6cm × 6cm)을 사용하였고, 인가자장의 세기는 실험부와 자석 사이의 거리를 조절하면서 제어하였다. 자장의 세기는 구간별로 나누어서 가우스 메타(Gauss meter, F.W.BILL model4048)로 측정하였다. 여기서 자석에 의한 자장의 인가가 X방향으로 균일하지 않기 때문에 실험결과에 오차가 예상되고 실험에서는 Table 2에서 보는 바와 같이 평균값을 자장의 세기로 사용하였다.

감온액정의 촬영은 디지털 카메라(Digital camera, C-3030ZOOM)를 사용하였고, 반사되는 부분을 없애기 위해서 카메라 앞부분에 디자인색장지(검은색)로 가렸다. 또한 디지털 카메라는 자장으로 인

한 장애를 예상하여 실험장치와 거리를 두어 설치하였고, 줌(Zoom)기능을 이용하여 촬영하였다.



- (1) Immersion circulator(hot side)
- (2) Immersion circulator(cold side)
- (3) Temperature control units
- (4) Control valve
- (5) Test cell
- (6) Permanent magnet
- (7) Digital camera

Fig. 8 Schematic diagram of the experimental apparatus

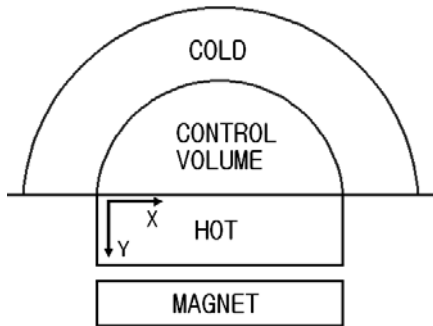


Fig. 9 The experimental apparatus

Table 2 Result of magnetometry (unit : mT)

X(mm) \ Y(mm)	0	10	20	30	40	50	60	70	ave
15	39	29	17	4	6	18	29	39	23.1
20	29	21	11	3	5	15	25	29	17.6
25	20	16	10	2	4	13	19	22	13.8
30	17	14	8	2	4	10	15	17	11.3

2.5 실험방법

감온액정의 반응온도가 20℃~25℃이기 때문에 실내온도를 저온관벽면온도보다 낮게 설정한다. 실험부내 기포의 혼입을 방지하기 위해서 자성유체는 유입구를 통해 주사기를 사용하여 천천히

주입한다. 반원관 외부의 저온부에 연결되어 있는 침수 전열기를 저온 관벽면온도인 20℃로 설정하고, 바닥면 아래의 고온부에 연결되어 있는 침수 전열기를 고온 관벽면온도인 25℃로 설정한다. 실험은 자석의 위치를 실험조건에 따라 조절한 후 침수 전열기를 작동시켜 고온부와 저온부에 가열된 물이 순환되면 시작한다.

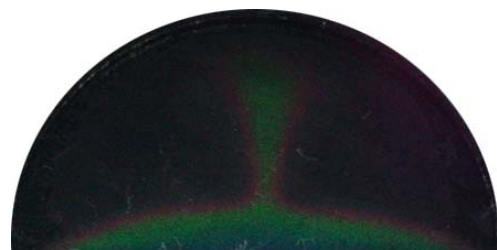
2-6 실험결과

본 연구에서는 자성유체의 자연대류 현상을 실험하였다. 정상상태에 도달하는 시간은 약 4분정도이고, 자장은 중력과 같은 방향으로 인가하였다.

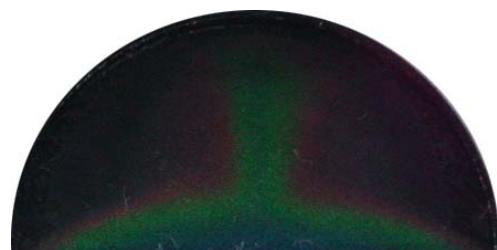
Fig. 10은 본 해석모델에 있어서 자장을 가하지 않은 경우의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 반원의 중심 부근에서 고온영역이 상승되고, 양 끝지점 부근에서 저온영역이 하강하는 것을 잘 볼 수 있다. 이것은 Fig. 2(d) 및 Fig. 3(d)의 수치해석 결과와 잘 일치한다.



(a) T = 0 min



(b) T = 2 min



(c) T = 4 min

Fig. 10 Temperature distribution at H = 0 mT

3. 결 론

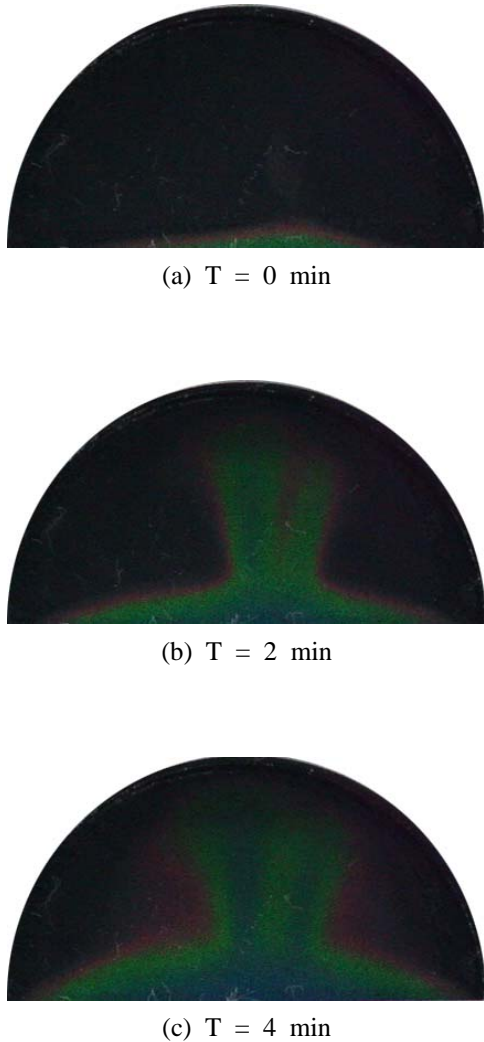


Fig. 11 Temperature distribution at $H = 13.8$ mT

Fig. 11은 본 해석모델에 있어서 자장을 13.8 mT 가한 경우의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 반원의 중심 부근에서 고온영역이 상승되고, 양 끝지점 부근에서 저온영역이 하강하는 것을 잘 볼 수 있다. 이것은 Fig. 2(d) 및 Fig. 3(d)의 수치해석 결과와 잘 일치한다.

Fig. 10과 Fig. 11의 실험결과를 보면 전체적으로 좌우 비대칭성을 볼 수 있는데 이것은 자장을 인가할 경우 전자석이 아닌 웨라이트 자석을 사용함에 따라 균일한 세기가 되지 못했기 때문이라 생각된다. 또한, 실험장치의 구성에 있어서 전면에 부착된 액정필름에 미치는 열전도에 의한 영향도 클 것이라 생각되고, 이는 차후 개선해야 할 문제이다.

1. 자성유체는 자장을 인가하지 않으면 뉴턴유체의 자연대류 현상을 나타내고 있으며, 인간자장의 세기에 따른 수치해석과 실험 결과는 정성적으로 일치하고 있다.

2. 자성유체유동에서 중력과 같은 방향의 인가자장의 영향은 대류현상을 더 활발하게 진행되게 하고, 이는 마치 Gr수가 증가한 경우와 같이 가열과 냉각온도차이가 증가한 것과 같은 대류현상을 나타내고 있다.

3. 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.

4. 자성유체의 유동은 외부의 자장에 의해 뉴턴유체에서 생각할 수 없는 자연대류의 제어가 가능하고, 이는 단열 및 방열에 대한 획기적인 제안이 될 것이라 기대된다.

참고문헌

- (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., Vol. 12, 2499 (1982).
- (5) J. W. Park and L. S. Seo, KSME, Vol. 23, No. 1, 25 (1999).
- (6) 志澤一之, JSME, Vol. 51, No. 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, Vol. 61, No. 581, 157 (1995).