

이중원관내 자성유체의 열전달 특성에 관한 연구

박정우[†]·박기태*·서이수**

A Study on the Heat Transfer Characteristics of Magnetic Fluids in Concentric Double Pipe Annuli

J. W. Park, G. T. Park and L. S. Seo

Key Words: Magnetic fluid(자성유체), Natural convection(자연대류), Concentric double pipe annuli(이중원관), Heat transfer(열전달), Magnetic field(자장)

Abstract

In this study, to research characteristics of heat flow of magnetic fluid, it's studied about numerical and experimental method of natural convections change and characteristics of heat transfer in Concentric double pipe annuli as analysis model. In the result, natural convection of magnetic fluid is controlled by direction and strength of the impressed magnetic field. Especially, according to average Nusselt number, heat transfer is the smallest on the balancing point between body force and buoyancy.

1. 서론

자성유체는 천연적으로 존재하지 않는 인공유체로 입자의 자성에 기초를 둔 자성체의 특성과 액체로서의 유동특성을 겸비하고 있다⁽¹⁾.

자성유체의 열유동에 관한 연구는 최근에 시작되었고 열전도율 측정 및 내부입자의 농도에 관한 영향은 규명되어 있지만⁽²⁾, 열역학적 성질과 열전도 및 대류에 관해서 연구는 미미한 상태이고, 또한 공업기술로의 응용에 있어서도 대부분 외부의 조건에 대한 물성변화와 비접촉 유지작용의 원리를 이용한 것이 대부분이며 아직 열유동의 제어에 대한 연구는 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 자성유체의 열전달 특성을 밀도 있게 연구하기 위하여 해석모델을 내부

와 외부원관에서 가열과 냉각하는 이중원관으로 설정하여 외부에서 인가자장의 세기와 방향에 따라 자연대류 현상의 변화 및 열전달 특성을 수치 해석 및 실험적으로 검토하고자 한다.

수치해석에 있어서 지배방정식은 비전도성 자성유체에 관한 棚橋의 식을 사용하였다⁽³⁾. 해법 알고리즘은 棚橋가 제안한 GSMAC 유한요소법을 이용한다⁽⁴⁾. 수치해석은 우선 실험과 같은 내외경비와 온도조건에서 등온선도 및 속도벡터를 통하여 유동특성을 파악하고 실험과 비교하였다. 또한 본 연구에서는 평균 Nusselt 수를 구하여 전열 특성을 파악하였다. 특히 중력과 반대방향의 자장을 가함에 따라 평균 Nusselt 수가 최소가 되는 자장의 세기를 임계 자성효과 파라미터로 나타내었다.

2. 수치적 연구

본 연구에서는 내부회전을 고려한 비전도성 자성유체의 지배방정식계를 사용하였고, 가정 및 무차원화를 통해 다음과 같이 나타낼 수 있다:

▶ 연속방정식

† 동아대학교 기계공학과 대학원

E-mail : jwnarada@hanmail.net

TEL : (051)200-6712 FAX : (051)200-7656

* 동아대학교 기계공학과 대학원

** 동아대학교 기계공학과

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

▶ 운동방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = & -\nabla p \\ & + \frac{1}{Re} \left(\nabla \cdot (\eta \nabla \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\eta \mathbf{v} \nabla) \right) \\ & + \frac{4 \varepsilon \sigma}{Re Pe_r} \mathbf{M} \cdot \nabla H \\ & - \frac{2 \varepsilon}{Re} \nabla \times (\sigma H M_o A_1 \boldsymbol{\omega}) + \frac{Gr}{Re^2} \beta T_1 \mathbf{e} \end{aligned}$$

▶ 에너지방정식

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{C_p Pe} \nabla \cdot (\kappa \nabla T_1)$$

▶ 자화구성방정식

$$\mathbf{M} = \frac{M_0}{H} (\mathbf{H} - Pe_r A_1 \mathbf{H} \times \boldsymbol{\omega})$$

여기서 $A_1 = \tau \eta_1 / (\eta_1 + \sigma H M_0 \tau)$, ε 는 극성효과 parameter, σ 는 자성효과 parameter, Gr 은 Grashof수, Re 는 Reynolds수, Pe_r 은 회전Peclet수이다.

본 논문에서는 자연대류문제에 있어서 광범위하게 사용되고 있는 Boussinesq 근사를 사용하였고, 그 외의 가정은 다음과 같다:

- ① 유체는 비압축성이고, 벽면에서 미끄러지지 않는다.
- ② 작용하는 외력은 중력만이다.
- ③ 誘起磁場은 인가자장에 비해 매우 작기 때문에 무시한다.
- ④ 화학반응 등에 대한 내부발열은 없다 ($\rho r = 0$).
- ⑤ 체적우력은 없다 ($\rho l = 0$).
- ⑥ 열전도율은 等方性이다.
- ⑦ 에너지방정식에서 압력일과 점성소산은 무시한다. 또한 지배방정식의 전개에 있어서 다음의 식을 적용하였다:

① Shliomis⁽⁵⁾에 의하면 자성유체의 경우 내부 각운동량과 입자의 회전각속도는

$$\rho \mathbf{s} = I \boldsymbol{\Omega}$$

의 관계가 성립한다. 여기서 \mathbf{s} 는 단위질량당 내부 각운동량, I 는 평균관성모멘트, $\boldsymbol{\Omega}$ 는 입자의 각속도 벡터이다.

② 棚橋⁽⁶⁾에 의하면 자성유체의 와점성계수는

$$\eta_1^* = \frac{3}{2} \phi_a \eta^*$$

가 성립한다. 여기서 ϕ_a 는 체적농도, η^* 는 자성유체의 점성계수이다.

본 연구에서의 작동유체는 Water base 자성유체(Ferricolloid W-40)를 대상으로 하였다. 자성유체의 물성치에 관한 연구는 충분히 이론적으로 정립되어 있지 않다. Table 1은 수치해석에 사용된 작동유체의 물성치를 나타낸 것으로 神山등⁽⁷⁾에 의하여 측정된 것을 일부 사용하였다. 여기서 자성유체의 비열, 체적팽창계수 및 열전도율에 관해서는 모액의 물성치와 같은 값을 취한다.

수치해석에서 해석모델은 Fig. 1에 나타낸 바와 같고, 자장의 세기는 중력과 같은 방향일 때 양(+), 중력과 반대방향일 때 음(-)으로 나타내었고, 수평방향일 때는 \perp 의 기호로 표기하였다.

본 연구에서 mesh는 이중원관의 원주와 반경에 대해서 41×21 의 균일격자를 사용했다. 수치해석에서 정상상태는 각 격자점의 무차원 온도가 전 시간step의 계산결과와 비교하여 0.001 이하가 되는 시점으로 하였다.

본 연구에서는 자장의 세기에 대한 무차원 파

Table 1 Properties of magnetic fluid(Ferricolloid W-40) (20°C 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 평균 관성 모멘트 (I)	1.1×10^{-14}
Boltzmann 정수 (k)	1.38×10^{-23} [J/K]
분산입자의 와점성계수 (η_1^*)	2.18×10^{-3} [Pa · s]
자성유체의 점성계수 (η^*)	1.06×10^{-2} [Pa · s]
자성입자의 포화자화 (M_s)	0.36 [Wb/m ²]

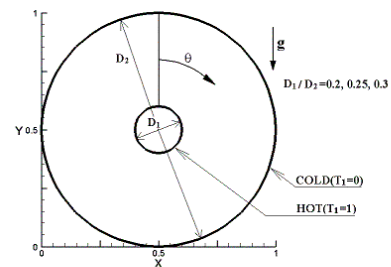


Fig. 1 Analytical model

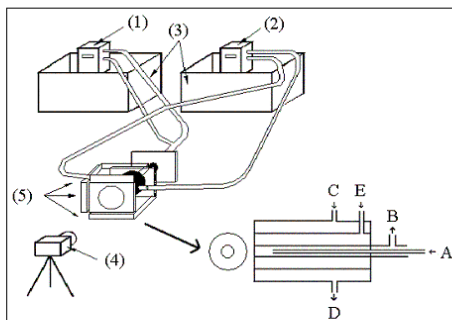
라미터로 σ 를 사용하여 나타내었고, 다음과 같이 정의되고 있다:

$$\sigma = \frac{M_{0y} H_0 \tau_r \tau_B}{I}$$

자성효과 파라미터는 입자의 유효반경, 단위체 적당 입자수, 온도, 입자의 포화자화 값과 자장에 의해 결정된다. 본 해석에서 자성효과 파라미터는 0, 12 및 24를 사용하였고, 이 경우 본 연구의 작동유체에 대한 정량적인 자장의 세기는 0 mT, 55 mT 및 106 mT이다.

3. 실험적 연구

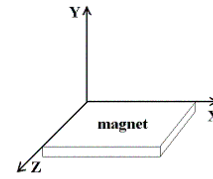
Fig. 2는 실험장치를 나타낸 것이다. 이중원관에서 내부원관은 고온벽면으로 하고 외부원관은 저온벽면으로 설정하였다. 또한 두 개의 원관은 열전달율이 좋은 상용동관(C2700)을 사용하였고, 제품의 규격 및 검사체적을 고려하여 외경과 내경이 각각 10 mm와 50 mm인 것을 사용하였다. 고온 및 저온의 온도는 고온벽면을 25°C, 저온벽면을 20°C로 설정하였으며 두 대의 침수 전열기(WBC-18E)를 통해 각각 가열된 물을 순환시킴으로서 균일하게 하였다. 자성유체는 불투명하므로 이를 가시화하기 위해서 감온액정(R20C5WA)을 실험부 전방 동관에 부착하였고, 반응온도는 20°C ~ 25°C로 온도에 따라 검은색, 적색, 녹색 및 청색으로 변화한다. 실험에 사용한 자석은 실험부에 수평방향으로 균일한 자장을 가하기 위해서



- (1) Hot circulator A : Hot water(inlet)
- (2) Cold circulator B : Hot water(outlet)
- (3) Water tank C : Cold water(inlet)
- (4) Digital camera D : Cold water(outlet)
- (5) Magnet direction E : Magnetic fluids

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

Table 2 Result of magnetometry



(unit : mT)

Y Distance	X	0 cm	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm	Ave.
0 mm		100	91	83	80	84	92	100	90
10 mm		43	42	39	37	39	41	43	40
20 mm		30	29	26	25	27	28	30	28

ND자석(1 cm × 1 cm)을 철판(6 cm × 6 cm × 1 cm)에 바둑판 형상으로 36개를 부착하였다. 인가자장의 세기는 실험부와 자석 사이의 거리를 조절하면서 제어하였다. Table 2는 자장의 세기를 구간별로 나누어서 가우스 메타(F.W.BILL model4048)로 측정한 결과이다. 여기서 ND자석에 의한 자장의 인가가 X방향으로 균일하지 않기 때문에 실험결과에 오차가 예상되고 실험에서는 그 평균값을 자장의 세기로 사용하였다.

4. 검토

Fig. 3(a)는 해석모델에 자장을 가하지 않은 경우의 수치해석결과로 정상상태에서의 등온선도를 나타낸 것이다. 그림에서 고온영역을 보면 그 형상은 버섯모양으로 뉴턴유체의 자연대류현상과 정성적으로 일치한다. Fig. 3(b)는 이중원관내 자장을 가하지 않은 경우의 실험결과를 나타낸 것으로 수치해석($\sigma=0$)과 비교해 보면 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3(c)와 Fig. 3(d)는 이중원관내 자성유체에 가하는 자장의 방향이 중력방향으로 하여 그 세기를 크게 한 경우로 각 그림에서 대류의 진행방향은 $\sigma=0$ 인 경우와 같다. 그러나 인가자장의 세기가 크게 될수록 내부원관 위쪽(Y=0.7)에서 상승하는 기류의 폭은 녹색부분을 기준으로 하여 $\sigma=12$ 일 때 약 0.28이고, $\sigma=24$ 일 때 약 0.2로 점차 감소하는 것을 볼 수 있고, 외부원관을 따라 하강하는 유체는 $\sigma=12$ 일 때 약 Y=0.48, $\sigma=24$ 일 때 약 Y=0.32의 지점까지 도달하는 것을 볼 수 있다. 본 연구의 해석모델에서 인가 방향이 중력

방향일 경우에 대한 자장의 영향은 이중원관의 온도차에 의한 밀도차이가 자기체적력으로 인해 크게 되고, 자장의 세기가 증가 될수록 그 영향은 더욱 크게 된다. 棚橋⁽⁸⁾에 의하면 인가자장에 대한 외견상 중력은 중력과 자기체적력의 합력으로 다음과 같이

$$g_a = g + \frac{K \nabla H}{\rho \beta}$$

로 나타내고 있다. 즉 본 연구의 해석모델에서는 자장을 중력과 같은 방향으로 가하여 그 세기가 크게 될수록 외견상 중력이 커짐에 따라 Rayleigh 수가 증가된 자연현상과 같다.

Fig. 3(e)와 Fig. 3(f)는 중력과 같은 방향으로 자장을 가한 경우 실험결과를 나타낸 것이다. 그림에서 고온영역의 발달은 H=0 mT 일 때 내부원관 윗 부분에 분포되어 있는데 비해 자장의 세기가 커져서 H=90 mT 가 될수록 내부원관 중간부분까지 넓게 분포되어 있다. 이는 수치해석결과와 비교해 보면 Fig. 3(c)와 Fig. 3(d)의 결과와 정성적으로 잘 일치한다. 본 연구의 수치해석과 실험결과에 대한 정량적으로 일치하지 않는 주요인은 자장에 대한 조건이 차이가 나기 때문이다. 즉 수치해석에서는 인가자장의 세기가 X방향으로 일정하고 Y방향으로 선형적으로 감소한다고 가정한 반면, 실험에서는 자석으로 자장을 가하였고 이 경우 자장의 세기는 자석과의 수직거리를 변수로 한 지수함수에 반비례한다.

Fig. 3(g)와 Fig. 3(h)은 자장을 중력과 반대 방향으로 가한 경우에 대한 등온선도를 나타낸 것이다. 그림에서 $\sigma = -12$ 일 경우를 보면 고온영역은 내부원관 하부로 약 $Y=0.16$, 상부로 약 $Y=0.78$, 좌측으로 약 $X=0.175$, 우측으로 약 $X=0.825$ 정도까지 발달하여 도달하게 된다. 이는 자장이 중력방향과 반대방향으로 인가됨에 따라 나타나는 자기체적력의 영향으로 온도차에 의해 나타나는 해석모델 상하의 밀도차가 감소하기 때문이다. 또한 이 경우 인가자장의 방향이 중력과 반대이기 때문에 자기체적력은 음(-)의 값을 가지게 되고, 인가자장의 세기가 커질수록 외견상 중력은 작아지게 된다. 이것은 마치 비자성유체의 자연대류에서 중력의 영향이 감소되는 것과 같고, 이는 Rayleigh 수가 감소된 경우의 대류현상이라 할 수 있다.

그림에서 $\sigma = -24$ 의 경우를 보면 고온유체는 내부원관 아래쪽에서 하강하여 외부원관을 따라 상

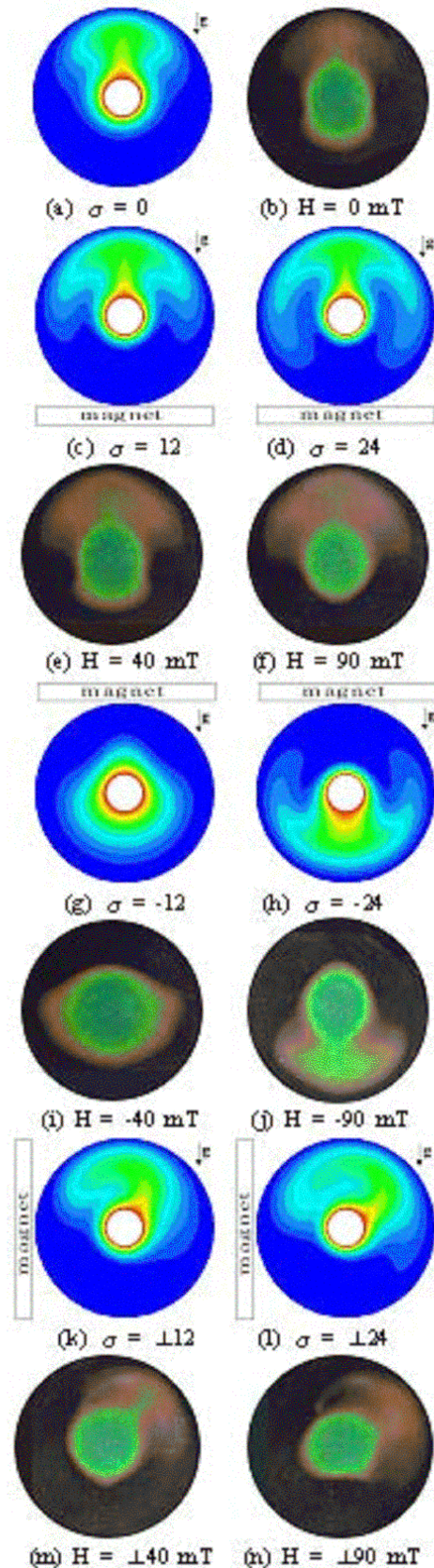


Fig. 3 The variation of temperature distributions at steady state

증하는 것을 볼 수 있다. 이는 자장을 중력과 반대방향으로 가하고 그 세기를 크게 함에 따라 해석모델 상부의 밀도가 하부보다 크게 되기 때문이다. 이것은 비자성유체의 자연대류에서 중력의 영향이 실제 중력과 반대방향으로 증가하는 것과 같다. 따라서 대류현상은 인가자장의 방향이 중력과 반대방향으로 그 세기가 $\sigma=-12$ 이상으로 커질수록 $\sigma=0$ 일 경우의 대류와 반대방향으로 활발하게 된다.

Fig. 3(i)와 Fig. 3(j)는 중력과 반대방향으로 자장을 가한 경우 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 3(i)를 보면 고온영역은 내부원관 주위로 전체적으로 발달하는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 3(j)를 보면 고온영역의 발달이 완전히 내부원관 아래쪽으로 발달하는 것을 볼 수 있다. 즉 이중원관내 대류는 뉴턴유체와 반대방향으로 진행되어 활발하게 된다. 또한 이는 수치해석결과와 비교해 보면 Fig. 3(g)와 Fig. 3(h)와 정성적으로 잘 일치한다.

Fig. 3(k)와 Fig. 3(l)은 자장을 중력에 수평 방향으로 가한 경우에 대한 등온선도를 나타낸 것이다. 이 경우에 자장은 해석모델 좌측에서 우측으로 인가한 것이다. 그림에서 $\sigma=\pm 12$ 및 $\sigma=\pm 24$ 의 경우를 보면 고온유체는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 약 $\theta=36^\circ$ 및 약 $\theta=48^\circ$ 방향으로 이동하여 상승한 후 외부원관을 따라 좌측으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 그리고 σ 가 증가함에 따라 내부원관에서 우측으로 이동된 영역은 점차 해석모델 우측($X=1$)으로 접근하고, 외부원관을 따라 좌측으로 이동된 영역은 점차 해석모델 좌측($X=0$)에 접근한다. 이것은 온도차에 의한 해석모델 상하의 밀도차 이외에 수평방향으로 인가되는 자장의 영향으로 나타나는 자기체적력에 의해 해석모델 좌우측에 밀도차가 나타나기 때문이다.

Fig. 3(m)와 Fig. 3(n)은 중력에 수평 방향으로 자장을 가한 경우 실험결과를 나타낸 것이다. 그림에서 인가자장의 세기가 커질수록 고온영역의 발달이 내부원관 위쪽에서 점차 우측에서 시작되어 진행된다. 이는 수치해석결과와 비교해 보면 Fig. 3(k)와 Fig. 3(l)의 결과와 정성적으로 잘 일치한다.

Fig. 4는 자장을 가할 때 원관의 중심을 기준으로 수평방향($Y=0.5$ 인 지점)에서 Y방향 속도성분 v 를 나타낸 것이다. 그림에서 자성효과 파라미터가 $\sigma=12$ 와 $\sigma=24$ 인 경우를 보면 그 크기가 커질

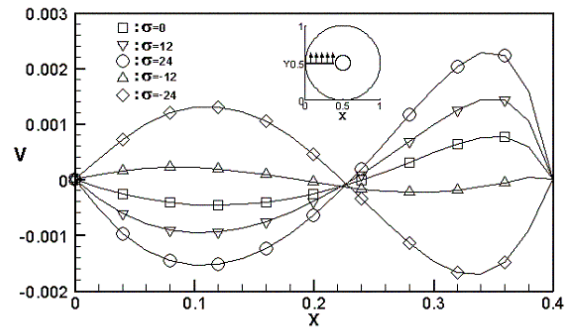


Fig. 4 Y-coordinate velocity for various magnetic intensities at $Y=0.5$, $D_1/D_2=0.2$

수록 내부원관 주위에서 상승하는 유체의 속도는 증가하고, 외부원관의 벽면을 따라 하강하는 유체의 속도 역시 증가하게 된다. 이것은 인가자장에 의해 이중원관내 대류현상이 활발해짐을 나타낸다. 그림에서 $\sigma=-12$ 의 경우를 $\sigma=0$ 과 비교해 보면 유체의 상승 및 하강속도의 크기는 거의 0이 되는 것을 볼 수 있다. 즉 이 경우 해석모델내 대류는 자기력으로 인해 거의 억제된 것을 나타낸다. 그림에서 $\sigma=-24$ 의 경우를 보면 유체는 내부원관($X=0.4$)에서부터 $X=0.24$ 까지의 범위에서 하강하고 $X=0.33$ 에서 속도의 크기가 최소값으로 되며, $X=0.24$ 부터 외부원관($X=0$)까지의 범위에서 상승하여 $X=0.11$ 에서 속도의 크기가 최대값으로 된다. 이것은 이중원관내 대류가 $\sigma=0$ 일 때와는 반대방향으로 활발하게 됨을 나타낸다.

Fig. 5는 정상상태에서 자장의 인가방향 및 세기에 대한 고온벽면의 평균 Nusselt 수를 나타낸 것이다. 그림에서 자장의 인가방향이 중력방향과 수평방향을 보면 σ 가 증가함에 따라 평균 Nusselt 수는 거의 선형적으로 증가한다. 또한 인가방향이 수평방향에 비해 중력방향 일 때 평균 Nusselt 수는 다소 크게 나타난다.

자장의 인가방향이 중력과 반대방향이 되는 경우를 보면 σ 가 증가함에 따라 평균 Nusselt 수는 감소하지만 약 $\sigma=-12$ 이상일 경우는 증가한다. 이는 자장의 영향으로 나타나는 부력이 온도차에 의한 부력과 반대가 되기 때문에 $\sigma=-12$ 이하 일 때 대류가 쇠퇴하여 평균 Nusselt 수가 감소한다. 또한 $\sigma=-12$ 이상이 되면 자기부력이 온도차에 의한 부력보다 크게 되기 때문에 σ 가 증가할수록 대류는 활발하게 되고 평균 Nusselt 수는 증가

한다. 특히 $\sigma = -19$ 이상이 되면 평균 Nusselt 수는 자장을 가하지 않은 경우보다 더 커지게 된다. 여기서 Fig. 5에 나타난 자료는 상용 프로그램인 ORIGIN(ver 6.1)의 Polynomial fit(3차 order)를 이용하여 자성효과 파라미터에 대한 평균 Nusselt 수는 다음식으로 나타낼 수 있다:

인가자장의 방향이 중력방향일 경우 선형적으로 변하여

$$\overline{Nu} = 12 + 0.2\sigma$$

이 되고, 인가자장의 방향이 수평방향일 경우 선형적으로 변하여

$$\overline{Nu} = 12 + 0.13\sigma$$

이 되고, 인가자장의 방향이 중력에 반대방향일 경우 3차함수로 변하여

$$\overline{Nu} = 12 + 0.1\sigma - 0.15\sigma^2 + 0.02\sigma^3$$

이 된다.

본 연구에서는 자장의 인가방향이 중력과 반대방향일 경우 평균 Nusselt 수가 최소가 되는 지점을 임계점으로 하였고, 이 경우 인가자장에 대한 σ 를 임계 자성효과파라미터(σ_c)라 하였다.

따라서 본 연구의 해석모델에서 열전달은 자장을 중력방향으로 가하여 그 세기를 크게 할수록 최대가 되고, 자장을 중력과 반대방향으로 가하여 임계점이 되는 세기가 되면 최소가 된다.

5. 결론

본 논문에서는 내부가 고온이고 외부가 저온인 이중원관 내 자성유체(Ferricolloid W-40)의 유동특성과 전열특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 균일자장하에서 이중원관 내 자성유체의 자연대류에 대한 수치해석과 실험결과는 정성적으로 일치하여 수치해석의 타당성을 확인하였다.

2. 이중원관 내 자성유체의 유동은 인가방향이 중력방향일 경우 자장의 세기가 커질수록 대류가 활발하게 되었고, 중력과 반대방향의 경우 임계자장 이하에서 인가자장의 세기가 커질수록 대류가 억제되었으며 임계자장 이상에서 자장을 가하지 않은 경우와 반대방향으로 대류가 활발하게 되었고, 수평방향일 경우 인가자장의 세기에 따라 대류가 활발하게 되었다.

3. 자성유체에 가하는 자장의 세기와 방향에

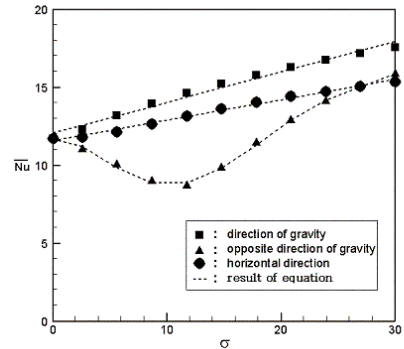


Fig. 5 Mean Nusselt number versus magnetic intensity

따라 평균 Nusselt 수의 증감은 다음과 같이 나타났다:

▶ 인가자장의 방향이 중력방향일 경우

$$\overline{Nu} = 12 + 0.2\sigma$$

▶ 인가자장의 방향이 수평방향일 경우

$$\overline{Nu} = 12 + 0.13\sigma$$

▶ 인가자장의 방향이 중력에 반대방향일 경우

$$\overline{Nu} = 12 + 0.1\sigma - 0.15\sigma^2 + 0.02\sigma^3$$

4. 이중원관 내 자연대류는 인가자장의 방향이 중력과 반대방향일 경우에 평균 Nusselt 수가 최소가 되는 임계점이 존재함을 알 수 있었다.

5. 자성유체의 열전달은 외부에서 가하는 자장의 방향 및 세기에 따라 제어할 수 있다.

참고문헌

- (1) 武富, 1988, “磁性流体基礎と應用, 日刊工業新聞社, 日本, pp. 109 ~ 122.
- (2) 日本機械學會, 2001, “機能性流体·知能流体, コロナ社, 日本, pp. 1 ~ 30.
- (3) 棚橋隆彦, 1995, “電磁熱流体の數値解析, 森北出版株式會社, 日本, pp. 53 ~ 62.
- (4) 棚橋隆彦, 1991, “GSMAC-FEM數値流体力學の基礎とその應用, アイピーシー, 日本, pp. 157 ~ 214.
- (5) R. MOREAU, 1990, Magnetohydrodynamics, Kluwer Academic Publishers, LONDON, pp. 1 ~ 12.
- (6) 棚橋隆彦, JSME, Vol. 49, No. 437, 53 (1983).
- (7) 神山新一, 1989, “磁性流体入門, 産業圖書, 日本, pp. 65 ~ 68.
- (8) 棚橋隆彦, JSME, Vol. 47, No. 414, 287 (1981).