

평행평판사이의 입구길이영역에서 자성유체의 유동해석

박정우* · 박기태* · 김유준* · 서이수**

Flow Analysis of Magnetic Fluid in Inlet Length Region between Parallel Plates

Jung Woo Park*, Gi Tae Park*, You Jun Kim*, Lee Soo Seo**

Key Words : *Magnetic Fluid*(자성유체), *Inlet Length*(입구길이), *Magnetic Effect Parameter*(자성효과 매개변수), *Polar Effect Parameter*(극성효과 매개변수)

ABSTRACT

It is attempted, in this study, to analyze the movement of the fluidity of polar magnetic fluid and to relate Newtonian fluid with the Inlet Length of infinity plates when distance between parallel plates is L . A numerical analysis is performed for the variation of inlet length when magnetic effect parameter and polar effect parameter which give special advantages to magnetic fluid are increased. From the result of numerical analysis, we confirmed that the inlet length shortens as the flux around the center axis is accelerated and the flux around the surface of a wall is controlled as the magnetic effect parameter and the polar effect parameter are increased.

1. 서론

자성유체는 용매중에 입자직경이 약 10nm 정도의 강자성체의 미립자를 약 10^{23} 개/ m^3 로 안정하게 분산시킨 현탁액이다.

자성유체는 분산성이 뛰어나 중력과 자장 등의 작용에 의하여 응집 및 침강 등의 고액분리를 일으키지 않으며, 강자성에 이르는 금속 특유의 성질과 유동성에 이르는 액체 특유의 성질을 겸비하고 있다. 이 성질을 이용해서 자기 잉크, Damper, 液晶, Heat Pump, 에너지 변환기, MHD 발전기 등의 타방면으로의 응용

을 생각할 수 있다. 이 때문에 실용화에 관심을 기울이고 활발한 연구가 진행되고 있으며⁽¹⁻²⁾, 유체공학적 입장에서 이 흐름의 거동을 상세하게 검토할 필요가 있다.

그러나 자성유체는 미시적 구조가 복잡하기 때문에 자성유체역학에서의 지배방정식계도 확립시키지 못하고 있는 것이 현재의 실정이다. 현재에 제안되고 있는 지배방정식계는 자성유체를 뉴턴 유체로써 다루는 것과 비뉴턴 유체로써 다루는 것으로 나눌 수 있다⁽³⁾. 전자는 단상의 유체로 가정해서 자장 작용 하에 있어서 자기체적력에 의한 영향을 조사하는 것을 목적으로 하는 경우로 Rosensweig⁽⁴⁾에 의해 제안되었다. 후자는 입자의 회전에 의한 효과 및 자기체적력의 양방향을 고려한 경우로 前者에 비해 물리적으로 엄밀하며, 그 적용범위도 광범위하다. 그러나, 입자의 회전 및 자화

* 동아대학교 기계공학과 대학원

** 동아대학교 기계공학과 (교신저자)

E-mail : lsseo@dau.ac.kr

의 완화현상을 고려하지 않으면 안되기 때문에 그 방정식계는 대단히 복잡한 형태가 된다. 이 방정식계는 Shliomis⁽⁵⁾, 志澤·棚橋⁽⁶⁾에 의해 제안되었다.

자성유체의 유동해석은 현재의 경우 Shliomis⁽⁷⁾ 및 棚橋⁽⁸⁾에 의해 이론적으로, Mctague⁽⁹⁾, 神山⁽¹⁰⁾ 및 富田⁽¹¹⁾ 등에 의해 실험적으로, 그리고 Seo⁽¹²⁾에 의해 열 이동 문제를 이론과 실험의 양면으로 연구가 이루어지고 있다. 그러나 대부분 입자의 회전운동 및 그 확산을 무시한 단지 일정 압력구배 하의 흐름에 대하여 관마찰 계수와 외관의 점도증가를 구하는 것에 불과하였다.

본 연구에서는 평행평판 사이의 입구길이를 대상으로 한 뉴턴 유체 및 극성의 자성유체에 대해서 유동해석을 행한다. Scheme의 경우는 志澤·棚橋 등에 의해 개발된 GSMAC(Generalized Simplified Marker and Cell method)법을 이용한다. 또한, 이론해석 결과의 검토방법은 자성유체의 특성을 나타내는 자성효과 매개변수와 극성효과 매개변수를 사용하여 조사한다.

2. 이론해석

2.1 지배방정식

서론에서 기술했던 것과 같이 본 연구에서는 지배방정식으로서 입자의 회전을 고려한 지배방정식계를 이용한다. 이 방정식계는 Shliomis에 의해 처음으로 제안되었고, 그 후 志澤·棚橋 등에 의해 엄밀하게 유도된 것이다:

▶ 연속 방정식

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

▶ 운동량 방정식

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla P + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + (\eta + \eta_2) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) + 2\eta_1 \nabla \times (\boldsymbol{\Omega} - \boldsymbol{\omega}) + M \cdot \nabla H \quad (2)$$

▶ 각 운동량 방정식

$$I \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} = (\alpha' + \beta') \nabla (\nabla \cdot \boldsymbol{\Omega}) + \gamma' \nabla^2 \boldsymbol{\Omega} - \frac{I}{\tau_S} (\boldsymbol{\Omega} - \boldsymbol{\omega}) + M \times H \quad (3)$$

▶ 자화의 완화 방정식

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{M} - \frac{1}{\tau_B} \left(\mathbf{M} - \frac{M_0}{H} \mathbf{H} \right) \quad (4)$$

▶ 자장의 방정식

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (5)$$

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

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M} \quad (7)$$

2.2 가정

수치해석에서 가정은 다음과 같다:

- ① 유체는 비압축성이다.
- ② 유동은 층류이다.
- ③ 평판은 무한히 넓다.
- ④ 체적력과 체적우력은 없다.
- ⑤ 유체는 벽면에서 미끄러지지 않는다.
- ⑥ 유도자장(Induced magnetic field)은 무시한다.
- ⑦ 자장의 방향은 축방향으로 한다.
- ⑧ 입자는 강제회전을 한다.
- ⑨ 자화의 대류항은 무시한다.

2.3 해석모델 및 경계조건

계산격자(mesh)는 30×30인 불균일 격자계를 사용하였으며 해석모델 및 경계조건은 Fig. 1과 Fig. 2에 나타난 것과 같다. 정상상태에 대한 수렴조건은 각 절점에서 이전 시간스텝에 대한 물리량의 증감변화가 10⁻⁸ 이하로 되는 것으로 설정하였다.

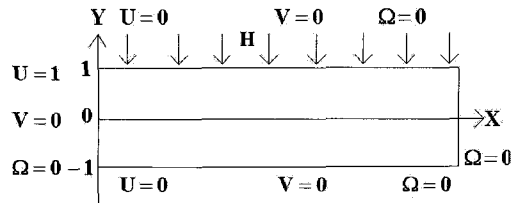


Fig. 1 Analysis model

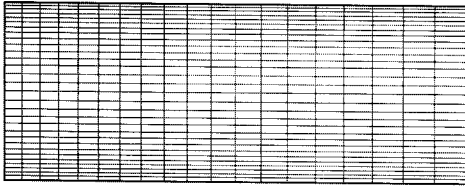


Fig. 2 Mesh design

3. 수치해석

3.1 무차원화

본 연구에 사용된 5가지 방정식은 2.2절의 가정을 적용한 후 아래의 무차원량을 사용하여 무차원화 한다:

$$\begin{aligned}
 v &= U_0 v^* & t &= (L/U_0)t^* \\
 P &= P_0 - \rho U_0^2 P^* & \Omega &= (U_0/L)\Omega^* \\
 Z &= LZ^* & X &= LX^* \\
 \nabla &= (1/L)\nabla^* & \omega &= (U_0/L)\omega^* \\
 H &= H_0 H^* & M &= M_0 M^*
 \end{aligned}$$

여기서, U_0 , L , P_0 , H_0 , M_0 는 각각 속도, 길이, 압력, 자장의 세기, 자화의 대표값이고, ρ 는 자성유체의 밀도이고, Ω 는 자성유체입자의 각속도이고, ω 는 유체의 와도이다.

지배방정식의 무차원화 결과 나타난 매개변수는 다음과 같이 표현한다:

◆ 유차원 매개변수

$$I = \rho i^2 \quad n_1 = I/4\tau_s$$

◆ 무차원 매개변수

레이놀즈 수	$Re = \rho U_0 L / \eta$
극성효과 매개변수	$\varepsilon = n_1 / \eta$
치수효과 매개변수	$\lambda = L / i$
회전 Peclet 수	$Pe_r = \tau_B U_0 / L$
자성효과 매개변수	$\sigma = \tau_s \tau_B H_0 M_0 / I$

여기서, I 는 단위체적당 평균관성모멘트이고, η 와 n_1 는 자성유체의 점성계수 및 입자의 외점성계수이고, τ_s 와 τ_B 는 입자의 유체마찰 및 브라운운동에 의한 완화시간이다.

또한 지배방정식은 무차원량을 사용하여 무차원화하면 아래와 같이 된다. 단, 무차원화 기호 *는 생략한다:

▶ 연속 방정식

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (8)$$

▶ 운동량 방정식

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v &= -\nabla P + \frac{1}{Re} \nabla^2 v \\
 &+ \frac{2\varepsilon}{Re} \nabla \times (\Omega - \omega)
 \end{aligned} \quad (9)$$

▶ 각 운동량 방정식

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Omega}{\partial t} + (v \cdot \nabla)\Omega &= \frac{1}{Re} \nabla^2 \Omega \\
 - \frac{4\varepsilon \lambda^2}{Re} (\Omega - \omega) &+ \frac{4\varepsilon \lambda^2}{Re Pe_r} M \times H
 \end{aligned} \quad (10)$$

▶ 자화의 완화 방정식

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \Omega \times M - \frac{1}{Pe_r} (M - H) \quad (11)$$

▶ 자장의 방정식

$$\nabla \times H = 0 \quad (12)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (13)$$

3.2 수치해석 결과 및 검토

본 연구에서 무차원 시간이 $t=2.0$ 이 되면 출구부분의 속도 변화가 거의 없으며 이 때를 정상상태로 본다.

수치해석에서는 매개변수로서 ε 와 σ 를 사용했다. ε 는 극성효과 매개변수이고, $\varepsilon = n_1 / \eta$ 로 정의되었다. $\varepsilon \rightarrow 0$ 은 입자의 회전운동에 대해서 용매의 점성작용이 작게 되는 것을 나타낸다. 즉, 입자와 용매사이의 마찰저항

이 작게 되어서 극성효과는 감소한다. 따라서 극성효과 매개변수는 유체와 미립자간의 마찰저항의 크기를 나타낸다고 말할 수 있다. 극성효과 매개변수는 자성 유체 입자의 반경과 단위체적당 입자 수에 의해 결정된다. 따라서 자성유체의 종류에 따라 결정된다고 할 수 있고, 극성효과 매개변수의 범위는 $0 \leq \epsilon < 1$ 이 된다고 볼 수 있다. Ferricolloid W-35의 경우에 극성효과 매개변수는 0.21정도이다. 따라서 본 해석에서는 0.4와 0.8의 극성효과 매개변수에 대해서 해석한다.

σ 는 자성효과 매개변수이고, 다음과 같이 정의되고 있다:

$$\sigma = \tau_{S^T} H_0 M_0 / I$$

자성효과 매개변수는 입자의 유효반경, 단위체적당 입자수, 온도, 입자의 포화자화 값과 자장에 의해 결정된다. 특히, 자장의 강도에 따라서 자성효과 매개변수는 $0 \leq \sigma < \infty$ 의 범위를 가진다. 현재 자석의 발달로 인해 웨라이트 자석으로 상온에서 자성유체 (Ferricolloid W-35)에 자성효과 매개변수가 약 8정도까지 인가할 수 있다. 따라서 본 해석에서는 자성효과 매개변수를 4.0과 8.0에 대해서 해석한다.

Fig. 3은 $Re=30$ 인 뉴턴 유체의 $t=2.0$ 에서 Y 에 따른 U 방향 속도 분포를 나타낸 그림이며 Fig. 4는 $Re=30$, $\epsilon=0.8$, $\sigma=8.0$ 인 자성 유체의 $t=2.0$ 에서 Y 에 따른 U 방향 속도 분포를 나타낸 그림이다.

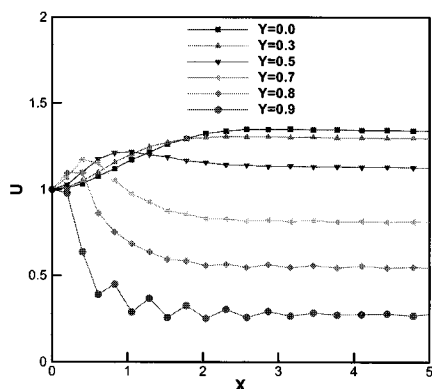


Fig. 3 Velocity distribution along the U-direction (newton fluid $Re=30$)

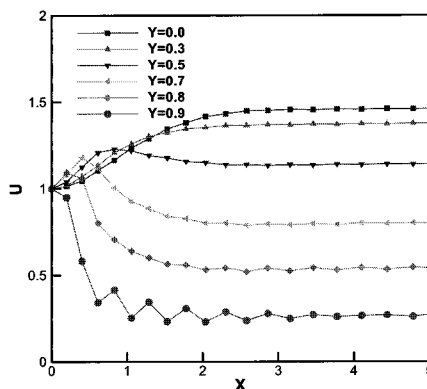


Fig. 4 Velocity distribution along the U-direction (magnetic fluid $\epsilon = 0.8$, $\sigma = 8.0$)

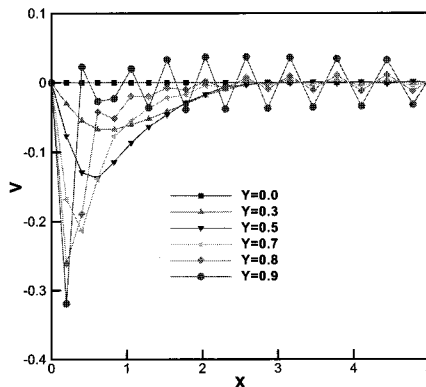


Fig. 5 Velocity distribution along the V-direction (newton fluid $Re=30$)

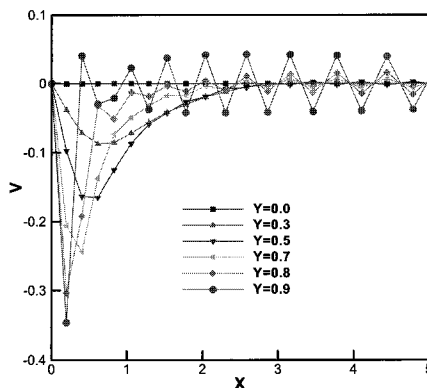


Fig. 6 Velocity distribution along the V-direction (magnetic fluid $\epsilon = 0.8$, $\sigma = 8.0$)

Fig. 3과 Fig. 4에서 $Y=0.0$ 인 중심 축 근방에서 $X=2$ 이후의 속도를 비교해 보면 자성 유체의 경우가 약 1.45이고, 뉴턴 유체의 경우 약 1.3이다. 또한, $Y=0.8$ 및 $Y=0.9$ 인 벽면 근방에서 X 방향에 따른 U 방향 속도를 보면 자성유체의 경우가 더 작은 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 $Re=30$ 인 뉴턴 유체의 $t=2.0$ 에서 Y 에 따른 V 방향 속도 분포를 나타낸 그림이고, Fig. 6은 $Re=30$, $\epsilon=0.8$, $\sigma=8.0$ 인 자성 유체의 $t=2.0$ 에서 Y 에 따른 V 방향 속도 분포를 나타낸 그림이다.

$Y = 0.9$ 인 벽면 근방에서 $X = 0.2$ 인 지점의 V 방향 속도를 보면 Fig. 5의 뉴턴유체의 경우는 약 -0.32 정도이고, Fig. 6의 자성유체의 경우는 약 -0.35 인 것을 볼 수 있다. 즉 자성유체의 경우 V 방향 속도가 음의 방향으로 더 발달하는 것을 볼 수 있다.

또한, 중심축 근방의 $Y=0.3$, $Y=0.5$ 인 곳에서 V 방향 속도가 0이 되는 지점이 뉴턴유체의 경우는 약 $X = 2.5$ 이고, 자성유체의 경우는 약 $X = 2.8$ 이다. 즉, 자성유체의 경우가 X 의 거리가 다소 길어지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3에서 Fig. 6을 보면 벽면근방($Y=0.9$)에서 U 와 V 가 진동이 되는 것을 볼 수 있다. 이것은 벽면 근방에서 계산격자가 경계층을 해석하기에는 다소 간격이 크기 때문에 그에 따른 오차로 사료된다.

Fig. 7은 $Re=30$, $t=2.0$, $X=4.0$ 에 있어서 ϵ 은 0.4로 고정하고 σ 을 4.0과 8.0으로 변화시켰을 때 뉴턴 유체와 자성 유체의 U 방향 속도 분포를 나타내고 있으며, Fig. 8은 $Re=30$, $t=2.0$, $X=4.0$ 에 있어서 ϵ 은 0.8로 고정하고 σ 을 4.0과 8.0으로 변화시켰을 때 뉴턴 유체와 자성 유체의 U 방향 속도 분포를 나타낸 그림이다.

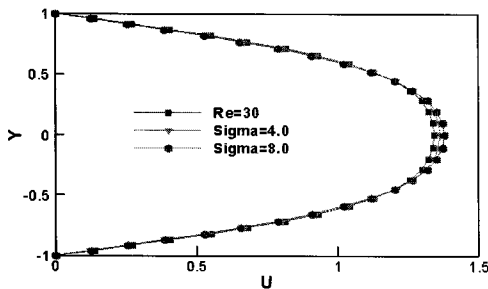


Fig. 7 Velocity Profiles ($\epsilon=0.4$)

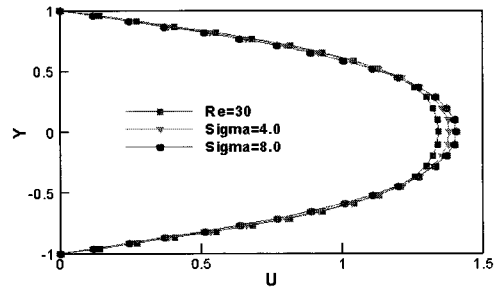


Fig. 8 Velocity Profiles ($\epsilon=0.8$)

Fig. 7과 Fig. 8에서 Y 방향에 따른 U 의 분포가 $Re = 30$ 인 뉴턴유체, $\sigma = 4.0$ 및 $\sigma = 8.0$ 의 순으로 더 크게 되는 것을 볼 수 있다. 또한, $Y = 0$ 에서 뉴턴유체 및 자성유체($\sigma = 4.0$ 과 $\sigma = 8.0$)의 U 속도를 보면 Fig. 7의 경우보다 Fig. 8의 경우가 그 크기의 차이가 두드러지게 나타남을 볼 수 있고, 속도가 더 커지는 것을 볼 수 있다. 즉, 극성효과가 커질수록 자성효과의 영향이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

위의 결과에서 알 수 있듯이 자성유체의 자성효과 매개변수 σ 가 증가되면 U 방향의 속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 자성효과 매개변수 σ 를 증가되면 인가자장의 세기가 증가하는 것을 의미하고, 점도의 증가를 가져온다. 또한 입자의 마찰저항에 대한 회전운동이 억제되고, 입자들은 회전 모멘트를 받아 자장의 방향으로 배열하게 된다. 즉 마찰저항의 영향으로 벽면에서의 속도는 감소하고, 중심축에서는 속도의 증가를 가져와 중심축 근방에서 U 방향의 속도를 가속화시켜 완전 발달된 영역이 되는 거리를 줄임으로써 입구길이를 짧게 만드는 원인이 되었던 것으로 생각된다.

또한, 극성효과 매개변수 ϵ 을 증가시키면 마찰저항이 커지게 되고, 이것은 유체가 마치 점성이 증가하는 점성유체의 속도분포를 나타내게 되어, 벽면에서의 속도를 억제시키고 중심축에서의 속도를 가속시키는 것이다. 이로 인하여 완전 발달된 포물선 형태의 속도분포를 가지는 X 의 거리를 줄임으로써 입구길이를 짧게 하는 것이다

4. 결 론

내부 회전을 고려한 기초방정식계를 생략하지 않고 유동해석을 하여 입구길이의 과도현상을 따랐던 결과

아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) GSMAC법을 평행평판 사이의 입구길이영역의 유동해석에 적용시켰다.

(2) 자성효과 매개변수 σ 를 증가시켰을 때 벽면 근방에서는 유속이 억제되고, 중심축 근방의 유체를 가속시켜 입구길이는 짧아졌다.

(3) 극성효과 매개변수 ϵ 를 증가시켰을 때 벽면 근방에서는 유속이 억제되고, 중심축 근방에서는 유체를 가속시켜 입구길이는 짧아졌다.

(4) 뉴턴유체에 있어서 입구로부터 하류로 갈수록 포물선 형태의 속도분포로 진행됨을 확인할 수 있었다.

(5) 자성유체에 있어서도 입구로부터 하류로 갈수록 포물선 형태의 속도분포로 진행됨을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 동아대학교 2006년도 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Y. L. Raikher, 1983, "The magnetization curve of a textured ferrofluid," J. of M.M.M., No. 39, pp. 11~13.
- (2) S. Kamiyama, 1983, "Pipe flow resistance of magnetic fluids in a nonuniform transverse magnetic field," J. of M.M.M., No. 39, pp. 23~26.
- (3) R. MOREAU, 1990, "Magnetohydrodynamics," KLUWER academic publishers, U.K., pp. 1~59.
- (4) R. E. Rosensweig, 1985, "Ferrohydrodynamics," Dover Publications, New York, pp. 33~38.
- (5) M. I. Shliomis, 1967, "Equations of Motion of a Fluid with Hydromagnetic Properties," Physics JETP, USSR, Vol. 26, No. 3, pp. 665~669.
- (6) 棚橋, 澤田, 1984, "磁性流体の解析方法に對する一檢討," 日本機械學會論文集 B, Vol. 49, No. 437, pp. 53~61.
- (7) M. I. Shliomis, 1986, "Magnetic Fluids," Academy of Sciences, USSR, pp. 427~458.
- (8) 棚橋, 志澤, 1985, "内部回傳を考慮した磁性流体の新しい基礎方程式" 日本機械學會論文集 B, Vol. 51, No. 461, pp. 95~102.
- (9) J. P. Mctague, 1969, "Magneto-viscosity of Magnetic Colloids," J. Chem. Phys., No. 51, pp. 133~136.
- (10) 神山, 小池, 1979, "磁性流体の圓管内の流れに關する研究," 日本機械學會論文集 B, Vol. 45, No. 389, pp. 37~43.
- (11) 富田, 石橋, 1986, "磁場の作用下における磁性流体ジェットの舉動に關する研究," 日本機械學會論文集 B, Vol. 52, No. 474, pp. 807~812.
- (12) 서이수, 박길문, 안종국, 2004, "장방형 용기내 자성유체의 Benard유동에 대한 전열제어 특성에 관한 연구," 유체기계저널, 제7권, 제4호, pp. 32~39.