研究論文

平行二平板電極間のERFの流れ特性*

築 地 徹 浩**, 高 橋 淳***
杉 本 旭****, 池 田 博 康****

Flow Characteristics of ERF between Two Parallel-Plate Electrodes

Tetsuhiro Tsukiji, Jun Takahashi, Noboru Sugimoto, Hiroyasu Ikeda

The purpose of the present study is to examine the flow characteristics of electro-rheological fluids (ERF) between two fixed parallel-plate brass electrodes. First, the microscopic behavior of the ER suspension structure between two fixed parallel-plate brass electrodes for the stationary ERF and flow of the ERF was investigated by flow visualization. Then the unsteady relationship between pressure drop and flow rate of the ERF between two fixed parallel-plates was measured under application of an electric field. Velocity distributions of the ERF were obtained by measuring those of the clusters using an image processing technique. On the other hand, the flow of the ERF between fixed two parallel-plates was solved theoretically using the constitutive equation for a Bingham fluid.

Key Words: New Material, Valve, Flow Visualization, ERF, Couette Flow

1. 結 言

一般に電気粘性流体と呼ばれている Electro-Rheological Fluids (以下ERFと言う.) は, 現在新機能材料として各分野で注目されている。ERFの特長は, 電場の印加によりそのせん断応力が変化する事である。近年ERFの開発に関する研究及びERFを使用した機器あるいはシステムに関する研究が頻繁に行われている^{1)~3)}。しかしながら, ERFの流動状態に関する研究は現在のところ非常に少なく, 最近電圧印加時の二重円筒形回転粘度計内のERFの周方向速度分布がレーザ流速計を用いて調べられた⁴⁾。ERF自体およびERFを使用した機器・システムの性能向上や高品位化を行う上で, 基本的な流れ場におけるERFの流動状態を知る事は, 非常に重要である。

本研究においては, 基本的な流れ場として二つの平行電極から構成される平行二平板間流路を取り上げた。

まず, ERFの静止時および流動時における流れの可視化実験を行った。今回は特に Winslow効果⁵⁾の現象に着目した。次に, 可視化結果に画像処理を施す事により, 速度分布を得た。更に, 平行二平板間流路における差圧と流量を時間的に測定し, 電場強度が差圧一流量特性に及ぼす影響を調べた。一方, Bingham流体を仮定した基礎式を用いて理論計算を行い実験結果と比較検討した。

2. 理 論 計 算

一般にERFはBingham流体に近い挙動を示すと言われているので⁶⁾, ここでも, ERFをBingham流体で近似した理論解析を行う。

解析する流れ場をFig. 1に示す。二次元定常非圧縮性層流の場合のCouette流れの x 方向の運動方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (1)$$

ここで, p は圧力, x は流れ方向の座標, y は流れと垂直方向座標, τ_{xy} はせん断応力である。

式(1)を y で積分すると次式が得られる。

$$\tau_{xy} = -Py + D \quad (2)$$

ここで, $P = -\frac{\partial p}{\partial x}$ であり, D は定数である。

ERFをBingham流体と仮定し構成方程式を次式で

*平成6年3月30日 原稿受付

**足利工業大学 機械工学科

(所在地 〒326 栃木県足利市大前町268-1)

***三輪精機(株)

(所在地 〒338 埼玉県与野市中里80)

****労働省産業安全研究所

(所在地 〒204 東京都清瀬市梅園1-4-6)

Fig. 1 Flow field

表す。

$$\tau_{xy} = \tau_e \text{Sgn} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3)$$

ここで、 τ_e は降伏応力（電場により誘起された応力）、 u は x 方向速度成分、 μ は粘性係数であり電場に依存しない。

次に、印加電圧を V 、電極間距離を h とすると電場強度 E は $E = \frac{V}{h}$ であり、 τ_e が E の2乗及び濃度 ϕ vol. %に比例すると仮定すると次式が得られる。

$$\tau_e = A \phi E^2 \quad (4)$$

ここで、 A は定数である。

一方、plug流れ流域（ $y_1 \leq y \leq y_2$ ）に於いて、

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0 \text{ であるから、式(2)及び式(3)より、}$$

$$-Py_1 + D = \tau_e \quad (5)$$

$$\therefore y_1 = \frac{D - \tau_e}{P} \quad (6)$$

が得られる。

更に、 $0 < y < y_1$ に於いて、 $\frac{\partial u}{\partial y} > 0$ であるから、式(2)及び式(3)より次式が得られる。

$$-Py + D = \tau_e + \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (7)$$

上式を y で積分すると次式が得られる。

$$\mu u = -\frac{P}{2} y^2 + (D - \tau_e) y \quad (8)$$

更に、 $y_1 < y < y_2$ に於いては次式のようになる。

$$\mu \bar{u} = -\frac{P}{2} y_1^2 + (D - \tau_e) y_1 \quad (9)$$

ここで、 $\bar{u}$ は $y_1 \leq y \leq y_2$ に於ける一様速度である。

一方、 $y_c < y < y_2$ に於いても同様に

$$-Py_2 + D = -\tau_e \text{ となり } y_1 = h - y_2 \text{ であるから、}$$

$$\frac{D - \tau_e}{P} = h - \frac{D + \tau_e}{P} \text{ より}$$

$$h = \frac{2D}{P} \quad (10)$$

が得られる。

流量 Q は、式(8)及び(9)を積分する事により次のように得られる。

$$\begin{aligned} Q &= H \int_0^h u dy = 2H \int_0^{y_c} u dy \\ &= 2H \left[\int_0^{y_1} u dy + \int_{y_1}^{y_c} \bar{u} dy \right] \\ &= \frac{2H}{\mu} \left[-\frac{P}{6} y_1^3 + (D - \tau_e) \frac{y_1^2}{2} + \mu \bar{u} (y_c - y_1) \right] \quad (11) \end{aligned}$$

ここで、 H は紙面に垂直方向の流路幅である。ニュートン流体の場合 $\tau_e = 0$ 、 $y_1 = y_c$ であるから、 $y_c = h/2$ 、 $D = hP/2$ とおくと次式のように表せる。

$$Q = \frac{H}{12\mu} h^3 P \quad (12)$$

計算手順は以下に示すとおりである。式(4)を用いて、実験により得られた E と τ_e の関係を近似する事により定数 A を決定する。次に、 h 、 P 及び E を与え、式(10)より D を計算し、式(6)より y_1 を求める。更に、式(8)、(9)及び(11)より、 u および Q を求める。

Fig. 2 Relationship between shear rate and shear stress

3. 本研究に用いたERFの特性

本実験では、 $10\text{mm}^2/\text{s}$ のシリコンオイルにセルローズを分散させた鬼怒川ゴム株式会社製のERFを用いた。使用したERFのせん断速度 $\dot{\gamma}$ とせん断応力 τ の関係をFig. 2に示す。これらの値は回転粘度計により測定された。Fig. 2より使用したERFは電場印加時においてBingham流体に近い特性を有していることが分かる。

せん断速度が 212 1/sec の場合の電場強度 E と降伏応力 τ_e の関係をFig. 3に示す。式(4)を用いて得られた二次曲線により実験値が良好に近似されている。

4. 実験装置および実験方法

実験装置概略図をFig. 4に示す。タンク内のERFは、ポンプにより平行二平板間流路へ送られ、再びタンクに戻る。顕微鏡を装着したCCDカメラを用いて可視化を行った。モーターの回転数を変化させることにより流量を変化させた。タンク内のERFと空気との接触を

Fig. 3 Relationship between electric field intensity and yield stress

避けるため窒素ガスを噴入し、ERFの沈澱を防ぐために攪拌器により常時攪拌して、ヒーターにより温度を一定に保った。

平行二平板間流路をFig. 5に示す。 $300 \times 20 \times 10\text{mm}$ の鉄製の電極を2枚使用しており、電極間距離は 2mm である。可視化を行うために電極以外はアクリル樹脂を用いて製作した。

印加電圧として 50Hz の一般家庭用交流電源を使用しトランスにより増幅させ、電場強度 E を $0 \sim 2\text{ kV/mm}$ の範囲で変化させた。ERFの濃度、印加電圧および流量を変化させて二平板流路内の可視化を行い、画像をビデオテープレコーダーに記録した。記録された画像から画像処理装置を用いて粒子追跡を行う事により速度分布を求めた。さらに、歪みゲージ式の圧力計により平行二平板流路前後の圧力を測定し、単動二連プランジャポンプのプランジャ変位をレーザ変位計で計測する事により流量の時間的な変化を得た。尚、可視化実験を行うに当たって、鮮明な画像を得る為に通常使われるERFにシリコンオイルを混ぜて濃度を $0.04\text{ vol. \%}$ あるいは $0.784\text{ vol. \%}$ 程度に極端に薄くした。

Fig. 5 Parallel plate electrodes

Fig. 4 Experimental apparatus

5. 可視化実験結果

5.1 流れの様子

ERFが静止している状態での、代表的な可視化例をFig. 6に示す。×200は顕微鏡の倍率を示しており、以下の図中においても同様である。電圧を印加することにより、鎖状につながるセルローズのかたまりであるクラスタが生成される。電場強度が増すにつれて、クラスタは長くなり、複数のクラスタどうしが付着して太いクラスタを形成している様子が分かる。

ERFが流動している状態での代表的な可視化結果をFig. 7に示す。上下の電極にクラスタが付着しており、電場強度が増加するほど電極に付着しているクラスタが長くなることが分かる。Fig. 7には、鮮明に現れていないが、流路中央付近のクラスタは、電極に付着しているクラスタに引っかかりながら流れていく。この様子のスケッチをFig. 8に示す。

更に、Fig. 7の電極付近のクラスタの様子を見るために、倍率を上げた場合の可視化結果をFig. 9に示す。電場強度の増加にともなって、電極に付着するクラスタは太く長くなる。

Fig. 6 Effect of an electric field on the arrangement of cellulose particles for the stationary ERF

以上のように、電場強度の増加とともにERFの流れの中に形成されるクラスタそのもの或いは、クラスタの結合力が流れの抵抗となることが分かる。

5.2 速度分布

可視化実験により得られた画像において、クラスタの移動計測を行うことにより得られた速度分布をFig. 10に示す。式(8)および(9)を用いて得られた計算結

(0.784vol.%×80, 0.6 [cm³/sec.])
Fig. 7 Observation on the ERF

Fig. 8 Schematic representation of clusters for ERF flow

Fig. 9 Observation on the ERF

果もあわせて示した。計算結果では、流路中央部に一樣速度分布の栓流 (plug flow) 領域が見られるが、実験結果においても同様な傾向が得られている。流量が大きい方が、速度分布も全体的に大きくなっている。

6. 圧力-流量特性実験結果

平行二平板間流路の上流および下流側圧力とポンプのプランジャ変位の測定結果の一例をFig. 11に示す。

Fig. 11に示した上流および下流側圧力の測定値から得られた差圧と流量の時間的变化をFig. 12に示す。電場強度の増加とともに差圧も全体的に増加しており、電場強度が2 kV/mmの場合の差圧の波形は特に時間的な変動が激しい。本実験においては、ポンプのプランジャの変位周波数が最大で1.18Hzであり、非定常性の影響は比較的小さいと考えられる。

差圧と流量の3～5周期間の測定値の平均を取る事により得られた平均流量と平均差圧との関係をFig. 13に示す。式(11)を用いて得られた計算結果も示してある。電場強度の増加とともに差圧も全体的に増加している。実験結果と計算結果を比較すると電場強度が1 kV/mmまでは良く一致しているが、それ以上の場合、特に低流量域で差が大きい。この原因は、電場強度が増すにつれて、一層セルロース粒子間の結合力が増シク

Fig. 10 Velocity distributions

Fig. 11 Pressure and displacement of plunger of pump ($\phi = 40 \text{ vol.}\%$)

Fig. 12 Flow rate and pressure drop ($\phi = 40$ vol.%)

Fig. 13 Relationship between average flow rate and average pressure drop ($\phi = 40$ vol.%)

ラストが成長し、クラスタとシリコンオイルがより分離する為に本計算で用いているBingham流体の仮定すなわちセルロース粒子がERF中に均一に分散しているとする仮定が成立しなくなる為であると考えられる。更に、電場を印加した場合、流量が増加するとともに、差圧も増加するが、ある流量以上になると差圧はほぼ一定になる。これはある流量以上になると、電極に付着しているクラスタが切れて流れ短くなり流路抵抗が減少するためであると考えられる。

7. 結 論

本研究では、ERFの流れのメカニズムを解明する第一段階として、平行二平板電極間のERFの流れを取り上げ、流れの可視化実験を行い電場強度がクラスタ生成および速度分布などの流れの様子に及ぼす影響を調べた。さらに、そのクラスタによる流路抵抗が平行二平板流路前後の差圧と流量特性に与える影響を定量的に実験と理論計算とにより明らかにした。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) ERF静止状態において、電場強度の増加とともに長く太いクラスタが形成される傾向が確認された。
- (2) ERF流動状態において、電場強度の増加とともに電極に付着したクラスタは長く太くなり流路中央部でのクラスタは電極に付着しているクラスタに引っかかりながら流れていく。
- (3) Bingham流体を仮定した理論計算により得られた二平板間流路の速度分布と可視化結果に画像処理を施すことにより得られた速度分布を比較した結果、両者により一様速度分布領域である栓流 (plug flow) 領域が確認された。
- (4) 平行二平板間流路前後の差圧と流量の関係を測定した結果、結論(1)および(2)で述べたクラスタによる流路抵抗により、電場強度が増すにつれて流量に対して差圧は全体的に増加した。さらに、理論計算結果と比較した結果、電場強度が1 kV/mmまでは良好に一致した。

謝 辞

ERFを提供して頂いた鬼怒川ゴム工業(株)の植草隆氏、ポンプを提供して頂いた(株)丸八ポンプ製作所の吉田友彦氏、実験装置製作等に御協力頂いた昭和理化学(株)の周藤澄男氏、当時足利工業大学4年生の歌代隆行、真下明幸両君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 杉本旭, 電気粘性流体(ERF)の機構とサーボ機構への応用, 油圧と空気圧, 23-7, 747/752, (1992)
- 2) 杉本旭, 池田博康, 空気圧シリンダへのER流体の適用, 油圧と空気圧, 24-7, 792/799, (1993)
- 3) 森下信, 電場利用機能性流体の応用, 日本機械学会誌, 96-899, 900/904, (1993)
- 4) 喜多義範, 大島竜也, 高瀬英生, 近藤伊知朗, 藤沢新坪, 電気粘性流体に関する基礎研究, 機論(B), 59-562, 1816/1821, (1993)
- 5) Winslow, W.M., J. Appl. Phys. 20 (1949-12), 1131
- 6) Atkin, R.J., Shi, X. and Bullough, W.A., J. Rheol 35-7, 1441/1461, (1991)