電気粘性流体に関する基礎的研究*

喜多義範^{*1}, 大島竜也^{*2}, 高瀬英生^{*3}
近藤伊知朗^{*4}, 藤沢新坪^{*5}

Fundamental Study of Electrorheological Fluids

Yoshinori KITA, Tatsuya OHSIMA, Hideo TAKASE,
Ichiroo KONDOO and Shinpei FUJISAWA

Electrorheological fluid (ER fluid) is a kind of two-phase fluid. It shows rheological behavior when an electric field is applied to it. Although numerous theoretical and experimental studies have been conducted at many laboratories and institutions, there is still an unsettling controversy regarding the fundamental mechanism involved in the ER effect. In this investigation, first, the effects of electric fields, shear rates and concentrations of dispersed particles on shear stress acting in the fluid were studied. Then, under various strengths for applied electric fields, the velocity profiles of ER fluid between electrodes were measured with a laser Doppler velocimeter. These measurements show that the fluid flow is divided into three layers: an almost-solid-state layer, two-phase layer and pure-liquid layer.

Key Words: Electrorheological Fluid, Laser Doppler Velocimeter, Velocity Profile, Winslow Effect, Ion Exchange Resin, Electric Field

1. 緒 言

電気粘性流体とは、電場が印加されるとその見掛けの粘度が変化する流体のことであり、ER(Electro Rheological)流体と呼ばれている⁽¹⁾。また、この見掛けの粘度変化は、ER効果と呼ばれており、クラッチや可変ダンパ⁽²⁾などの装置に応用しようとする研究が盛んになってきた⁽³⁾。そして、新しいER流体の開発や、ER効果のメカニズムについての理論的な研究も数多くなされてきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかしながら、実験的な研究の多くは、印加電場強さやせん断速度を種々に変えた際のせん断応力の変化のみを調べたもので、高電圧印加時の狭い電極間を流れるER流体の流動状態はまだ明らかでなく、流速などを計測するなどして調べたものは少ない。そこで本報では、分散系ER流体を用い、電場強さ、せん断速度および分散質濃度などをパラメータとして、見掛け粘度の変化の様子を調べるとともに

に、電圧印加時のER流体の流動状態を知るために、レーザ流速計を用いて電極板間の流速分布を調べた。

2. 実験装置および実験方法

本実験装置は、二重円筒形回転粘度計を参考にしたもので外円筒回転式である。内円筒回転式であると、Taylor渦のような強い二次流れが生ずる。このような二次流れを極力少なくするために外円筒回転式とした。さらに、本実験装置と一般的な回転粘度計との相違点は、横軸形にしている点である。これは、縦軸形では分散質粒子の沈降により、上下方向に濃度分布が生じてしまうが、横軸形の場合には、仮に分散質粒子が両円筒間下部に沈降しても、上述のように外円筒を回転させることにより、再び分散質粒子を均一に分散させることができるからである。

図1に実験装置の概略を示す。内筒①は、極板となるステンレス製のパイプで、この両端にエンジニアリングプラスチック製円板を栓となるように圧入したものであり、この両円板の中心をステンレス製の軸が貫通した構造になっている。そしてこの軸はカップリングを介してトルク計に接続されている。また内筒極板へのリード線は、軸の中心に設けられた長い細穴を通り極板に接続されている。

* 平成4年3月10日 中国四国支部第30期総会講演会において講演、原稿受付 平成4年4月1日。

*¹ 正員、岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。

*² 准員、三菱自動車工業(株) (〒444 岡崎市橋目町字中新切1)。

*³ 学生員、岡山大学大学院。

*⁴ 正員、水島機械金属工業団地協同組合 (〒719-11 総社市真壁1490)。

*⁵ 陽南工業(株) (〒719-11 総社市井尻野61)。

外円筒②は、エンジニアリングプラスチック製の円筒の内側に極板であるステンレス製パイプを圧入し、ビスで固定して一体化したもので、プーリとタイミングベルトを介してパルスモータにより計画された回転速度が与えられるようになっている。極板は、外筒の外側に取付けられた幅 30 mm の銅製リング③とボルトを介して通電性が保たれている。そしてこのリング③とブラシ④を通して、静止系である外部から電圧を印加できるようになっている。

両円筒は、それぞれシールタイプのベアリングを有した厚い側板⑤により、静止系に支持されている。なお、内円筒側極板は、半径 29.5 mm、軸方向長さ $L=100$ mm、表面積 185 cm^2 である。外円筒側極板は半径 31 mm で、それゆえ両極板間隔は 1.5 mm である。

両極板に印加された電圧は、1000:1 の高電圧用プローブを通してデジタルストレージオシロスコープに入力され記録される。また、内円筒表面に生じたせん断応力 τ によるトルク T は、トルク計から電圧信号として出力され、デジタルストレージオシロスコープに入力される。

流速測定用実験装置は別途に作られた。構造的には、上述のトルク測定用実験装置と同じであるが、異なる点は次に示すとおりである。極板間の流動状態が横から観察できるように、一方の側板を透明なアクリル製の板にした。そしてレーザ光を入射する部分のみ局所的に、レーザ光の交点が極板間の軸方向中央位置にとどくように、肉厚を 4 mm と薄くした。したがって、この側板が強度的に弱いアクリル製であるから、反対側の側板だけでも支持できるようにされている。

図 2 に流速測定用実験装置の概略図を示す。内円筒

側極板①の半径は 28 mm、外円筒側極板②の半径は 31 mm であり、それゆえ極板間隔は 3 mm である。本装置は流速測定用であるので、レーザプローブの半径方向トラバースにおける位置決めの精度上、極板間隔は広いほうが好ましく、3 mm と 2 倍にした。また軸方向長さ L は 20 mm である。それゆえこの場合、軸方向長さ L と極板間隔 h のアスペクト比 L/h は 7 程度あり、軸方向中央付近では流れの二次元性はほぼ保たれていると思われる。極板間での流速測定は、円筒の軸方向長さの中心位置で、半径方向に 0.5 mm 間隔、さらに詳しく調べる必要がある際には 0.1 mm 間隔で行った。また、各測定点で 12 回流速測定を行い、そのうち最大値と最小値の 2 回分を省いた 10 回分のデータから、流速 U の平均値と標準偏差 σ を求めた。そしてこれらの測定を、種々の電場強さに対して行った。

前述した二つの実験装置とともに、円筒半径に比して極板間隔が 1.5 mm や 3 mm と非常に狭いため、電圧が印加されていない際には両極板間の流体の流れは、ほぼジェット流れになっていると思われる。したがって、せん断速度 γ は外円筒周方向速度 U_0 と内円筒周方向速度 U_1 を用いて $(U_0 - U_1)/h$ と定義される。しかし本報においては、内円筒はトルク計に接続されており $U_1=0$ となるため $\gamma=U_0/h$ と表した。

3. 供試 ER 流体

本実験に使用した分散系 ER 流体は、杉本ら⁽⁴⁾が用いたのと同じで、強塩基性陰イオン交換樹脂ダイヤイオン SA 10 AS を分散質とし、トリ 2 エチルヘキシルトリメリテートであるトリメックス T-08 を分散媒に

図 1 トルク測定用実験装置概略図

図 2 流速測定用実験装置概略図

用いたものである。しかし、このイオン交換樹脂は吸水性が高く、良好な ER 効果を得るには過度の水分を含有している。そこで、減圧加熱処理を施し、水分除去を行った。

また大きな ER 効果を得るためには分散質粒子の粒径が小さく、そして粒径もそろっているほうがよい⁽³⁾。入手したイオン交換樹脂の粒径は 120~240 μm の間に分布していた。そこで、数種類のふるいでイオン交換樹脂を粒径別に仕分けし、そのうち最も量の多かった約 200 μm 前後の粒子を実験に用いた。また、乳鉢を用いて粒子を粉碎し、粒径を小さくしたのも実験に使用した。粉碎粒子は、その平均粒径が 100 μm と 50 μm の 2 種類を用意した。図 3 はイオン交換樹脂の写真である。図 3(a) は粉碎していないイオン交換樹脂の写真であり、図 3(b) は粉碎したイオン交換樹脂の写真である。粉碎していない粒子は、形状はきれいな球形である。それに対して、粉碎粒子はその形状が球形から大きくずれており、電荷の集中しやすい突起状のものまで存在している。

(a) 非粉碎粒子

(b) 粉碎粒子

図 3 イオン交換樹脂

4. 実験結果および考察

4.1 トルク測定 分散質濃度 ϕ が 10 wt% の ER 流体を用いてトルクの測定を行った。その結果を図 4 と図 5 に示す。

図 4 は、せん断応力 τ [kPa] のせん断速度 γ [s^{-1}] による変化の様子を、電場強さ E [kV/mm] をパラメータとして示したものである。電場強さ $E=0$ kV/mm のときには、ER 流体はニュートン流体であることがわかる。しかし電場を印加すると、降伏応力を持つようになり、 $E < 3$ kV/mm の場合には、せん断速度 γ とともに τ が増加するビンガム流体的な挙動をするようになるが、 $E > 3$ kV/mm と大きくなると、降伏応力値も大きくなり、 τ はせん断速度 γ とともに減少し、大きな γ でほぼ一定の値となる傾向を示している。このように、これらの降伏応力は、印加する電場強さが強くなるほど、大きくなっていることがわかる。

図 5 は、せん断応力 τ と電場強さ E の関係を、せん断速度 γ をパラメータとして示したものである。いずれのせん断速度 γ に対しても τ は E の二乗にほぼ比例して増加している。このことは、ER 効果の理論的考察から導かれる $\tau \propto E^2$ という関係とよく一致してい

図 4 せん断応力-せん断速度線図

図 5 せん断応力-電場強さ線図

る。

分散質濃度 ϕ [wt%] がごく低い場合には、 τ は ϕ に比例して大きくなるのが理論的に知られている。そこで、せん断応力 τ と分散質濃度 ϕ の関係を、電場強さ E をパラメータとして図 6 に示した。図 6 によれば、 ϕ が大きいほど τ も大きくなっており、弱い電場の場合 ($E < 4$ kV/mm) には、 $\phi = 40$ wt% 程度の濃度までも τ と ϕ の比例関係が成立している。しかし電場が強くなると ($E > 4$ kV/mm), $\phi = 20$ wt% 程度までしかこの関係は成立しないことがわかる。

次に、分散質粒子の含水率の差異による違いを見るために、完全乾燥させた粒子を空气中に数分間放置し、水分を吸着させて、実験を行った。分散質濃度は 10 wt% で、せん断速度が $\gamma = 216$ s⁻¹ である場合の結果を図 7 に示す。以後、これまでの実験に使用した粒子を含水率が低い粒子と呼び、空气中に放置した粒子を含水率が高い粒子と呼ぶことにする。

図 7 によれば、同じ電場強さで両者を比較すれば、含水率の高いほうが、ER 効果が大きく、得られる τ も大きい。が、 $E = 3.5$ kV/mm で放電してしまう。しかしながら、含水率の低い ER 流体のほうは、高電場を得ることができ、その結果、含水率の高い ER 流体よりも大きなせん断応力を得ることができる。

次に、粉碎した粒子を用いて実験を行った場合の結果を図 8 に示す。縦軸はせん断応力 τ [kPa] で、横軸は電場強さ E [kV/mm] である。使用した粉碎粒子は、平均粒径が 100 μ m と 50 μ m の 2 種類である。分散質濃度は $\phi = 10$ wt% で、せん断速度は $\gamma = 86$ s⁻¹ である。また、比較のために粉碎していない粒子 (平均粒径 200 μ m) の結果も図 8 中に示した。

まず、粉碎粒子と粉碎していない粒子の結果を比較した場合、粉碎粒子のほうが ER 効果が小さいことがわかる。次に、粉碎粒子径で比較すると、粉碎粒子径が小さいほど ER 効果が小さくなっていることがわか

る。

これは、粉碎粒子が電場のもとでクラスタを形成しても、前掲の図 3 に見られるように粒子の形状がいびつなため電荷がうまく分布せず、クラスタを形成する粒子間引力が弱くなるためではないと思われる。そして、さらに粉碎して粒子径を小さくした場合は、粉碎の程度が著しいので、より粒子形状がいびつになっていると思われる。したがって、粉碎粒子径が小さなものほど ER 効果も小さくなったものと思われる。

4.2 電圧印加時の分散質粒子の様相 図 9 は、電圧印加時の分散質粒子の様子を写真に撮影したものである。分散質濃度 ϕ は 7 wt% で、電場強さは $E = 1.5$ kV/mm である。

図 9(a) は、せん断速度が与えられていない場合の写真であり、極板間に粒子が鎖状に半径方向に並んだクラスタが形成されているのが明りょうにわかる。

図 9(b) は、せん断速度が極めて小さい場合の写真である。極板間に形成されたクラスタは、ほとんど破壊されてはいないが電極板移動方向に斜めになり、そして極板との間でわずかながら滑りが生じている。

図 9(c) は、せん断速度が大きい場合の写真である。極板間に形成されていたクラスタはもはや破壊され、

図 7 セン断応力-電場強さ線図(含水率による差異)

図 6 セン断応力-分散質濃度線図

図 8 粒径別のせん断応力-電場強さ線図(粉碎した場合)

上側の極板付近に粒子の密集した層が形成されているのがわかる。

4・3 流速分布の測定 電圧が印加されてせん断応力 τ が増加しているときの流動状態がどのようなになっているかを調べるため、レーザ流速計を用いて極板間の流速を測定した。

図 10 に得られた流速分布を示す。粒子の分散質濃度は 15 wt% で、縦軸は内円筒からの距離 Y [mm] であり、横軸は周方向速度 U [m/s] である。また、 $Y=3.0$ mm 上の $\oplus$ 印は外円筒の周速度 $U=0.65$ m/s を示している。

図 10(a) は電場強さが $E=0$ kV/mm の場合の流速分布を示している。このときの流速分布はほぼクエット流れであるとみなすことができ、せん断速度は Y

(a) せん断速度=0(静止)

(b) 低せん断速度

(c) 高せん断速度

図 9 電圧印加時の ER 流体の状態

図 10 電極板間の流速分布

図 11 電極板間の流速分布の模式図

にかかわらず一定で $\gamma = 216 \text{ s}^{-1}$ である。

図 10(b)～(e)は、印加電場強さが $E = 1.0 \sim 2.5 \text{ kV/mm}$ まで 0.5 kV/mm ごとに増加させた場合の流速分布を示したものである。

図 10(b)では、もともとクエット流れであった流速分布が、 $E = 1.0 \text{ kV/mm}$ の電場強さを印加されたことによってわずかに変化していることがわかる。

図 10(c)～(e)においては、回転する外円筒に近いところでは、外円筒とほぼ同じ速度で流動している層が現れているのがわかる。そして、電場強さが大きくなるにつれて、その層の厚さが大きくなっている。このような層では、分散質粒子が密集しており、そこでは、シャーベット状になり粒子間での相対的な位置関係が時間的にあまり変化しなくなった層とみなせるものである。電場が強くなると、粒子間の引力が強くなり、各粒子が互いに引っ張り合って密集して、この層の厚さが大きくなったと考えられる。それにともなう、内円筒に隣接したごく薄い層内では粒子の濃度も小さく、速度こう配の大きな層が形成されている。

電場強さが強い際の流速分布のモデルを図 11 に示す。すなわち、電極間の ER 流体の流動状態は図 11 の A, B, C 層の 3 層に分けられる。

A 層は、強い電場に基づく粒子間引力によって密集した粒子間の相対的な位置関係がほぼ固定化された状態にある。この粒子群と分散媒の間の相対速度はあってもごくわずかであり、流体力としては Darcy の法則のような、粒子密度の高い所を流れる流体が受ける力と同様な力が働いていると考えられる。

B 層では、A 層の下端部に存在する粒子が、C 層の流体の抵抗を受け A 層からちぎれたり、くっついてを繰返していると思われる。このようにして、A 層と C 層の間で運動量の交換が行われていると思われる。

C 層においては、クエット流れのときよりも大きな

せん断速度を持ち、この薄い層内では粒子がほとんど存在していない低濃度状態になっているものと思われる。そう考える理由を、分散質濃度が $15 \text{ wt\%}$ の ER 流体の場合について以下に示す。電場を印加していないときの ER 流体の粘度は、ほぼ $\eta = 0.4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ であった。しかしながら、電場強さ $E = 1.5 \text{ kV/mm}$ のときの τ と、図 10(c)の流速分布から求めた γ より C 層での見掛けの粘度を求めると、 $\eta = 0.32 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ であった。これは上述の値 0.4 よりも小さいことから、この層では分散質濃度が $15 \text{ wt\%}$ よりもずっと低い状態になっていると考えられる。

5. 結 言

分散質にイオン交換樹脂であるダイセイオン SA 10 AS、分散媒に絶縁油であるトリメックス T-08 を用いた分散系含水系 ER 流体に関する種々の実験より、次のことが明らかになった。

(1) イオン交換樹脂を用いた ER 流体で、ER 効果が確認され、 $\tau \propto E^2$ および高濃度まで $\tau \propto \phi$ という関係が成立することが、実験的に確かめられた。

(2) 粉碎粒子を用いた場合の ER 効果による見掛け粘度の変化は、非粉碎粒子を用いた場合に比べて小さく、粉碎粒子径が小さいほど、効果は小さくなる。

(3) 含水率を低く抑え、高電場を印加するほうが大きな ER 効果が得られることが確認された。

(4) 電場を印加すると、極板間にクラスタが形成され、せん断速度が小さい場合はそのクラスタは破壊されないが、せん断速度が大きくなると破壊され、流動状態がせん断速度とともに変化することが確認された。

(5) レーザ流速計を用いて電圧印加時の流動状態の様子を調べることにより、電圧印加時の極板間の ER 流体はほぼ 3 層に分かれていることが見いだされた。それゆえ、電極板間の ER 流体は“電圧を印加した場合でも、均一な分散系流体で、見掛けの粘度だけが增加する”とはみなせないことが明らかになった。

文 献

- (1) 杉本・ほか 2 名, 労働省産業安全研究所報告, RIIS-RR-28-6(1980), 8.
- (2) 森下・ほか 2 名, 日本機械学会第 67 期通常総会講演論文集, (1990), 177-179.
- (3) スマート流体研究会, スマート流体に関する調査報告書, (1990), 3.
- (4) 笹田・本多, 機械の研究, 32-1~12(1980), 33-1~7(1981).
- (5) Klass, D. L. and Martinek, T. W., *J. Appl. Phys.*, 38-1(1967), 67.