

## PIV 기법을 이용한 ER 유체의 유동특성에 관한 실험적 연구

장 태 현†

(원고접수일 : 2003년 9월 19일, 심사완료일 : 2003년 12월 12일)

### Experimental Study on Flow Characteristics of ERF by using PIV Technique

Tae-Hyun Chang†

**Abstract** : An experimental investigation was performed to study the characteristics of ER (Electro-Rheological) fluid flow in a horizontal rectangular tube with or without D.C volatage. To determine some characteristics of the ER flow, 2D PIV(Particle Image Velocimetry) technique is employed for velocity measurement. This research found the mean velocity distribution with 0 kV/mm, 1.0kV/mm and 1.5kV/mm for  $Re = 0, 0.62, 1.29$  and  $2.26$ . When the strength of the electric field increased, the cluster of ERF are clearly strong along the test tube and the flow rate decreased.

**Key words** : Electro-Rheological Fluids(전기점성유체), Cluster(클러스터), Particle Image Velocimetry(입자영상유속계)

#### Nomenclature

A : cross-sectional area of the test tube  
b : the height of the test tube  
E : D.C. voltage  
H : the width of the test tube  
L : the length of the test tube  
 $\dot{m}$  : mass flow rate  
 $\Delta P$  : pressure drop  
Re : Reynolds number  
u : axial velocity  
 $u_m$  : mean axial velocity

v : radial velocity  
X : axial length  
X/b : non-dimensional length  
y : radial distance from tube wall  
 $\tau$  : shear stress

#### 1. 서 론

전기점성유체는 일반적으로 ERF(Electro-Rheological Fluids)유체라고 불리우며, 비전도성의 절연성 오일 속에 강한 전도성의 고체 미립자를 분산시킨 현탁액이며 전기장의 강도에 따라 전단응력이 변화하는 기능성 유체이다. ER유체의

† 책임저자(경남대학교기계자동차공학부), E-mail : changtae@kyungnam.ac.kr, Tel: 055-249-2613

구성요소는 전기전도성의 오일, ER효과를 증대시키기 위한 첨부제 등으로 구성되어진다. ER효과를 증대시키기 위한 조건으로 전기절연성의 오일은 물과의 친화력이 없어야 하고 유전율이 낮아야 한다. 또한, 전기전도성의 고체미립자는 적당한 양의 수분흡수를 위해서 물과의 친화력이 있어야 하고 유전율이 높아야 하며 다공성이어야 한다.

ER유체의 유동상태에 관한 연구로서 Wang<sup>(1)</sup> 등은 실험적인 고찰없이 수치해석 기법으로 ER유체의 유동특성을 설명하였고, Simmonds<sup>(2)</sup>는 평판형의 ER밸브를 제안하여 전기장에 따른 압력강하를 고찰하였다. Brooks<sup>(3)</sup>는 ER밸브를 이용한 유압회로를 구성하여 성능시험을 수행하였으며, Tsukiji<sup>(4)</sup>는 ER유체를 빙햄(Bingham) 유체로 가정한 기초식을 이용해서 이론계산을 수행하였다. Yokota와 Kondoh<sup>(5)</sup> 등은 2포트 ER밸브를 개발하여 유량, 밸브의 입·출구에서 생기는 압력강하, 전기장 강도에 따른 정특성을 실험적으로 연구하였다. 한편, 국내에서도 전영식<sup>(6)</sup>, 박명관 등<sup>(7)</sup>은 좁은 평행평판 전극사이에서 ER유체의 유동가시화 실험을 수행하였고, 장성필 등<sup>(8~10)</sup>은 분산계 ER유체의 기초연구 및 ER-Valve를 제작하여 성능시험을 수행하였다. 그러나 이들 연구의 대부분이 압력감소와 전단응력 등에만 국한 되었고, PIV(Particle Image Velocimetry)기법을 이용하여 ER유체를 거시적인 관점에서 물질구조의 거동 및 유변물성(Rheological Material)의 변화를 일으키는 전기유변현상에 관한 연구는 수행되지 않은 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 PIV기법을 이용하여 전기장 강도에 따른 분산계 ER유체의 정지 및 유동시의 가시화 실험을 수행하여, 이 유체의 유동특성을 연구하고자한다.

## 2. 실험장치

Fig. 1은 실리콘 오일과 전분 입자를 혼합한 ER유체의 유동특성을 가시화하기 위한 실험장치 및 PIV 시스템의 개략도를 나타낸 것이다.

Fig. 2와 Fig. 3은 ER유체의 유동특성을 가시

화하기 위한 테스트 튜브의 형상을 나타낸 것이다. 전극부의 길이는 240mm, 폭은 25mm인 구리 전극 2개를 사용하여 전극간의 간극이 13mm인 유로를 제작하였다. 테스트 튜브의 유로에서 기포가 생기는 것을 방지하기 위해서 입구쪽에는 배기구를 설치하였다. 그리고 테스트 튜브의 입·출구쪽 직경은 7mm이다. 또한, 내부 유동을 CCD카메라 및 육안으로 관찰할 수 있도록 투명한 아크릴을 사용하였으며, 유로의 좌·우측에는 동제박판(0.1mm)을 이용하여 전극으로 사용하였다. 한편 고전압 발생에 의한 감전의 위험이 없도록 테스트 튜브의 베이스 부분과 각 요소의 결합 부분은 나일론 합성수지를 사용하여 절연시켰다.

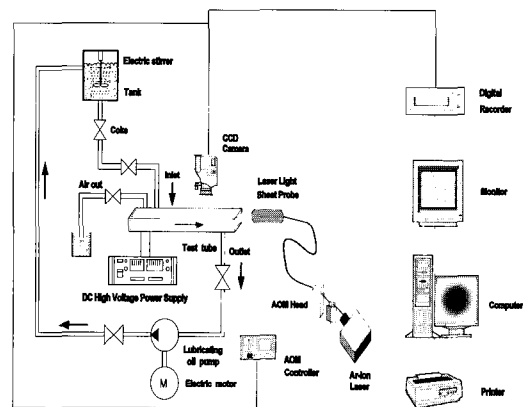


Fig. 1 Experimental apparatus and PIV system.

ER유체가 정지된 상태와 유동상태를 분리하여 관찰할 수 있도록 설계·제작하였다. 조성한 입자 분산계 ER유체는 탱크내에 저장하고, 전분 입자의 침전을 방지하고 입자 분포를 균일하게 하기 위해 전동식 교반기로 교반하였다. ER유체는 탱크로부터 위치에너지 차이에 의해 테스트 튜브의 유로를 흐르게 설계하였다. 유량은 테스트 튜브 유로의 상류부와 하류부에 설치된 콕을 사용하여 조절하였다. 테스트 튜브 유로의 크기는  $13\text{mm}^b \times 20\text{mm}^h \times 200\text{mm}^l$ 이며, 유로의 상·하면에는 구리 전극을 사용하여 전극으로 사용하였고, 측면에는 레이저 빔을 이용하여 가시화 할 수 있도록 제작하였다.

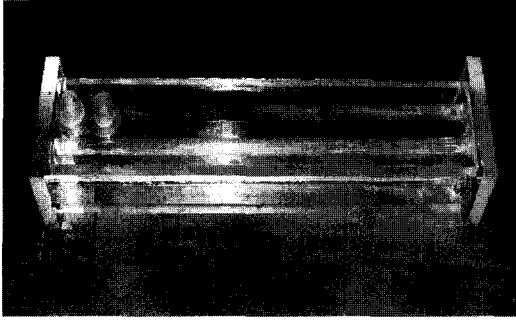


Fig. 2 Photograph of the test tube.

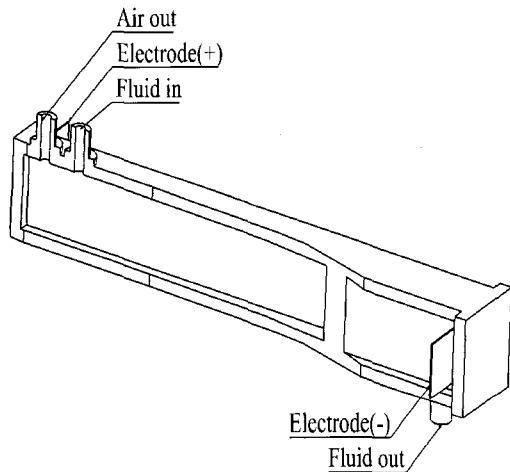


Fig. 3 Geometry of the test tube.

### 3. 실험방법

실험에 사용된 ER유체는 S사(ShinEtsu Silicone Korea Co.)의 실리콘 오일(KF96-50cSt)과 전분 입자( $180\mu\text{m}$ )를 혼합한 분산계 ER유체이며, 자체 조성하였다. 조성한 분산계 ER유체는 탱크내에 저장하고, 전분 입자의 침전을 방지하고 입자 분포를 균일하게 하기 위해 전동식 교반기로 교반하였다. ER유체는 탱크로부터 위치에너지 차이에 의해 테스트 튜브의 유로를 흐르게 설계하였다. 유량은 테스트 튜브 유로의 상류부와 하류부에 설치된 콕을 사용하여 조절하였다. 테스트 튜브 내에서 입자의 침전을 방지하기

위해서 15도 방향의 각을 주어 흐르게 하였다. 완전발달된 유동장을 형성하기 위해 X방향의 유동장 길이는 유동장이 충분히 발달 할 수 있도록 주어져야 하는데 본 실험에서  $X=60$ 을 부여하였으며, 입구부의 영향이 최소화 되도록 하였다. 테스트 튜브의 상부쪽과 출구쪽에는 CCD 카메라와 광원을 설치하여 ER유체의 유동을 가시화 할 수 있도록 하였다. 본 연구에 사용된 소프트웨어는 T사가 개발한 Thinker's를 이용하였다. ER 유체의 입자로부터 얻은 속도로부터 테스트 튜브 내의 평균속도를 계산하고, 테스트 튜브의 점수길리와 ER 유체의 동점성계수를 이용하여 Reynolds 수를 계산하였다.

#### 3.1 PIV 시스템

입자의 변위를 구하는 알고리즘은 속도벡터의 추출에 이용되는 개별입자의 중심을 이용하여 입자속도 벡터를 구하는 방법(Particle Tracking Velocimetry, PTV)과 입자군의 분포에 대한 상관 관계로부터 대표 속도를 구하는 PIV(Particle Image Velocimetry)로 구분될 수 있다.

본 연구에서 사용된 방법은 2차원 PIV 기법을 사용하였다. 실험에 사용된 광원은 공랭식 500mW Ar-ion 레이저를 이용하였다. 광원의 이동을 용이하게 하기 위해 광케이블로 빛을 이동시킬 수 있는 LLSP(Laser Light Sheet Probe)를 사용했다. 또한 이 LLSP는 레이저 층의 두께를 약 1mm 정도 조절을 할 수도 있다. 광케이블의 길이는 약 10m이다. 펄스화된 광원을 얻기 위해서 AOM (Acoustic Optical Modulator)를 사용했다. 유동장의 획득을 위해서 1초에 30장의 이미지를 획득할 수 있는 Panasonic 사의 CCD (Charge Couple Device) 카메라 WV3P310를 사용했다. 영상의 기록을 위해 디지털 레코더가 사용되었다. 그리고 획득된 이미지를 컴퓨터로 0에서 255단계의 gray 레벨로 전송하는 DT3155 (640×480 pixel) 보드를 사용하였다.

#### 4. 실험결과 고찰

Fig. 4는  $Re=2.267$ 에서 전압을 인가하지 않은 상태에서 PIV기법을 이용하여 ER유체의 입자의 흐름을 측정된 결과이다. 이 입자의 거동으로부터 얻은 속도벡터를 Fig. 5에 나타내었다. 속도벡터는 전형적인 층류유동을 보여주고 있다. 이 속도벡터로부터 계산한 국소 속도를 Fig. 6에 나타내고 있다. 테스트 튜브 중앙에서는 최대속도를 나타내고, 양 벽면 근처에서는 최소값을 보여주고 있다.

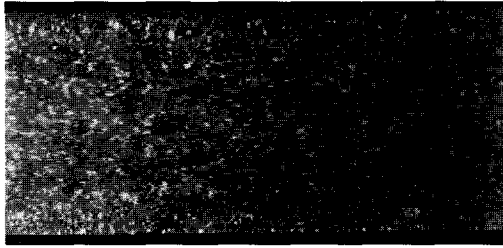


Fig. 4 Distributions of electro-rheological particles for  $Re=2.267$  along the test tube without D.C Voltage.

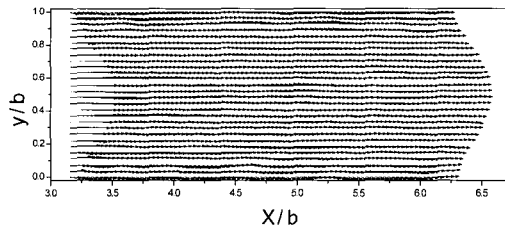


Fig. 5 Mean velocity vectors distributions along the test tube for  $Re=2.267$  without D.C voltage.

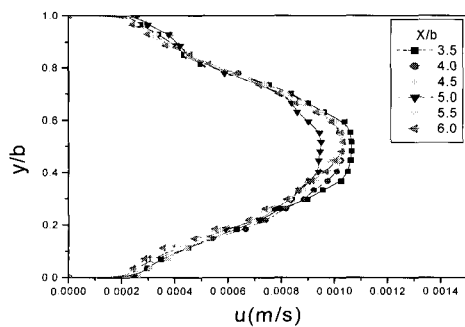


Fig. 6 Velocity distributions along the test tube for  $Re=2.267$  without D.C voltage

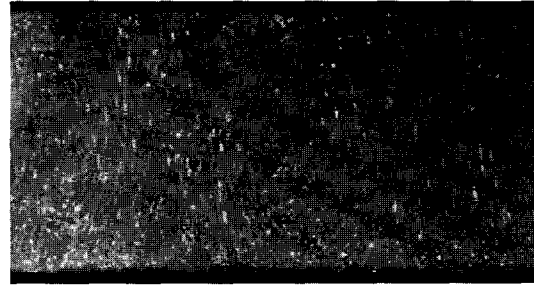


Fig. 7 Distributions of electro-rheological particles along the test tube for  $Re=0$  with D.C 1.5kV/mm.

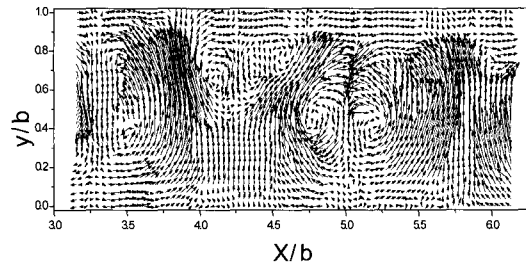


Fig. 8 Mean Velocity vectors distributions along the test tube for  $Re=0$  with D.C 1.5kV/mm.

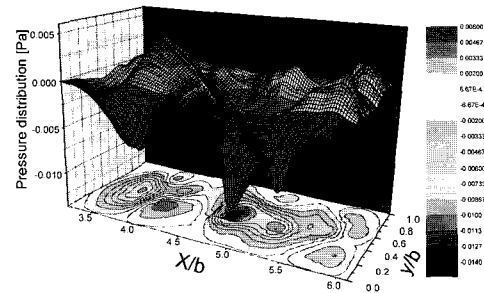


Fig. 9 Vortex flow distributions along the test tube for  $Re=0$  with D.C 1.5kV/mm.

Fig. 7~Fig. 12 유체가 정지한 상태( $Re=0$ )에서 D.C 전압1.5kV/mm를 인가한 경우이다. Fig. 7은 ER유체입자의 유동현상으로 전압이 인가 되었을 때 테스트 튜브의 상하로 심하게요동하는 것을 볼 수 있다. 이 입자의 속도벡터를 Fig. 8에 나타내고, 테스트 튜브를 따라  $y/b = 0.1 \sim 0.9$ 에서 아주 강한 와류현상을 나타낸다. Fig. 9는 이와 같은 와류유동의 와도(vorticity)를 압력

분포로 나타내고 있다. 속도벡터의 결과와 같이  $X/b = 3.5 \sim 4.0$ ,  $X/b = 4.5 \sim 5.0$ 에서 강한 와도를 나타내고 있다.

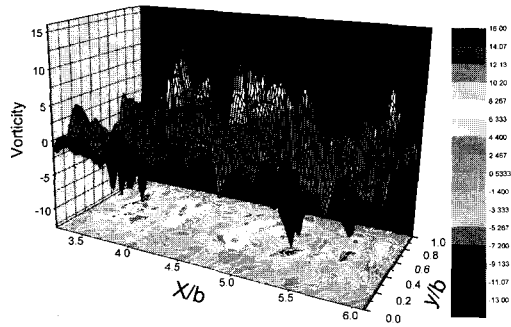


Fig. 10 Velocity vectors distributions along the test tube for  $Re=0$  with D.C 1.5kV/mm.

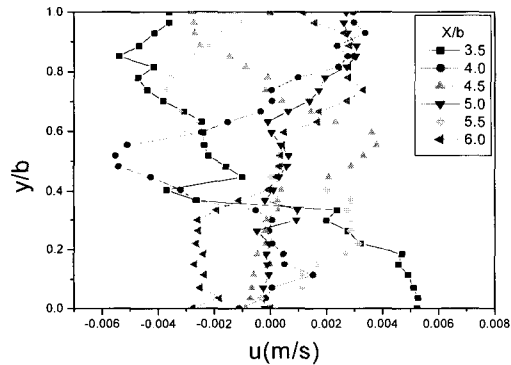


Fig. 11 Axial velocity distributions along the test tube for  $Re=0$  with D.C 1.5kV/mm.

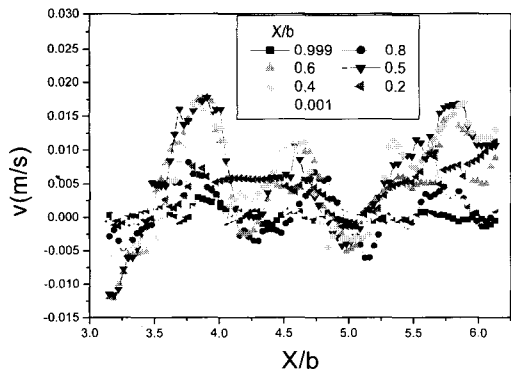


Fig. 12 Radial velocity distributions along the test tube for  $Re=0$  with D.C 1.5kV/mm.

Fig. 10과 Fig.11은 속도 벡터의 윤곽과 극소 축방향속도를 나타낸다. Fig.11에서는 테스트 튜브 상하에 역류 현상이 발생하고 있다. 이것은 인가전압에 의한 유동의 와류현상과 연관된 것으로 생각된다. Fig. 12는 반경방향속도분 포를 나타내고 있다. 강한 와도의 영향으로 아주 큰 반경방향 속도 분포를 나타내는 것이 특징이다.

Fig. 13 ~ Fig. 15는 인가전압 0.5kV/mm에서 ER유체의 유동으로, Fig. 13의 테스트 튜브 앞부분에서는 클러스터(Cluster)가 없으나, 뒷부분에서 클러스터( $\nabla$ )가 미세하게 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 ER유체의 유속증가에 따른 관성력이 전기적인 인력보다 크기 때문에 클러스터가 파괴되기 때문이라고 생각된다. 이와 같은 영향으로 Fig. 14와 Fig.15에서 속도벡터와 극소 속도는 인가전압에 크게 영향을 받지않고 있다.

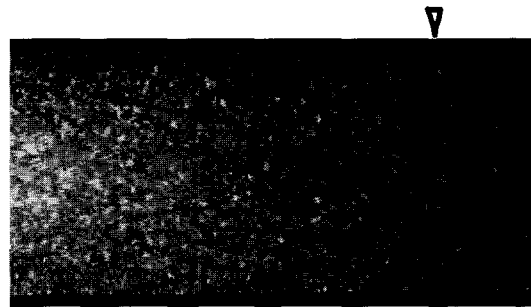


Fig. 13 Distributions of electro-rheological particles for  $Re=2.077$  along the test tube with D.C 0.5kV/mm.

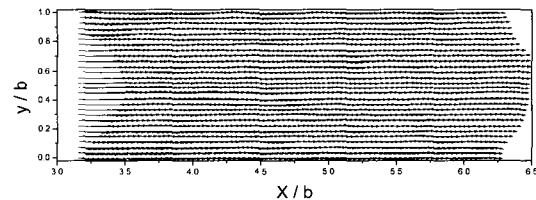


Fig. 14 Mean velocity vectors along the test tube for  $Re=2.077$  with D.C 0.5kV/mm.

Fig. 16~18은 인가전압 1.0kV/mm에서 ER 유체의 거동을 나타낸다. 입자의 결합력이 커져 양쪽의 전극에 띠 형태의 클러스터가 많이 형성된 것을 확인할 수가 있다. 이와 같이 형성된 클러스터에 의해 ER유체의 속도분포가 바뀌게 되며, 입

구와 출구에서의 압력강하가 발생하게 된다. 유로 내에 형성된 락 형태의 클러스터는 한번 형성된 후 그 형태를 지속적으로 유지하는 것이 아니고, 파괴와 생성의 과정을 짧은 주기로 반복하는 것을 볼 수 있었다. Fig. 16과 Fig. 17에서 속도분포는 인가전압에 의한 클러스터의 영향으로 테스트 튜브의 하부쪽으로 증가하고있는 현상을 Fig. 18에 나타내고 있다.

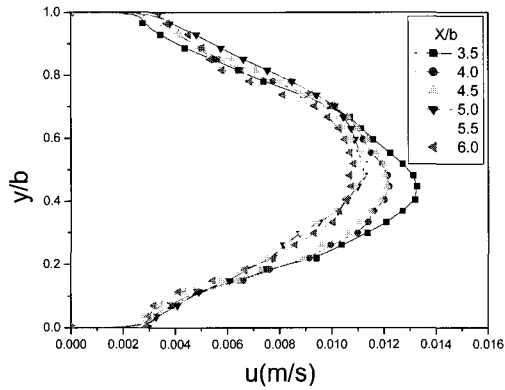


Fig. 15 Velocity distributions along the test Tube for Re=2.077 with D.C 0.5kV/mm.

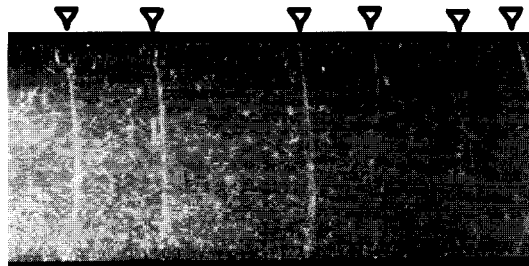


Fig. 16 Distributions of electro-rheological particles for Re=1.29 along the test tube with D.C 1.0kV/mm.

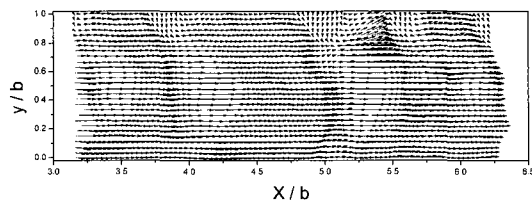


Fig. 17 Mean velocity vectors distributions along the test tube for Re=1.29 with D.C 1.0kV/mm.

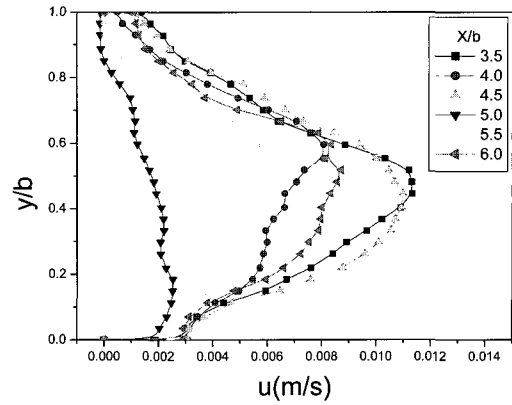


Fig. 18 Velocity distributions along the test tube for Re=1.29 with D.C. 1.0kV/mm.

Fig. 19~Fig. 21은 전기장의 강도  $E=1.5kV/mm$ 로 인가시키고 유량을 변화시킨 경우의 PIV 측정 결과를 나타낸 것이다. Fig. 19와 같이 유속이 작은 경우에는 전극 근방에서 형성된 클러스터가 유로 중앙부근에까지 형성되며, 유속이 점차 증가함에 따라서 유로 중앙부의 클러스터는 파괴되는 현상이 나타난다. 이것은 ER효과에 의해 형성된 전분 입자의 전기적 인력보다도 ER유체의 유속증가에 따른 관성력이 크기 때문에 클러스터가 파괴되는 것으로 생각한다. 그러나 전극 부근에서는 ER유체의 점성효과와 전분 입자의 클러스터에 작용하는 전기력이 유체의 관성력 보다도 상대적으로 클 것으로 예상되므로 전극부근에서는 클러스터가 파괴되지 않음을 알 수 있으며, 입자가 전극부분을 향해서 배열되는 것을 알 수 있다. 또한 전기장 강도의 증가에 따라서 전극에 부착하는 클러스터는 굵어지고 길어지며 ER유체의 흐름 중에 형성된 클러스터 또는 클러스터의 결합력이 유동저항이 되는 것을 알 수 있으며,  $X/b=4.0$  이후에서는 테스트 튜브 상부에서 유체가 역류됨을 알 수 있다. 전기장 무인가시에는 전극부분에서 유속이 영(zero)이고 나머지 부분에서는 포물선 형태의 속도 성분을 갖던 ER유체가, 전기장에 의하여 형성된 클러스터 때문에 유속의 변화를 나타내는 것을 알 수 있다. 그리고 이와 같이 형성된 클러스터에 의하여 유로를 통과하는 유량이 변화하

거나, ER유체의 입구와 출구에서 압력강하가 생기게 된다. 테스트 튜브의 유로를 흐르는 ER유체는 전기장의 강도에 따라 (+), (-) 전극에 생성되는 클러스터의 양이 변하게 되며, 유로 중앙부에서 전류(Plug Flow) 영역이 생기는 것을 확인할 수 있었다.



Fig. 19 Distributions of electro-rheological particles for  $Re=0.62$  along the test tube with D.C 1.5kV/mm.

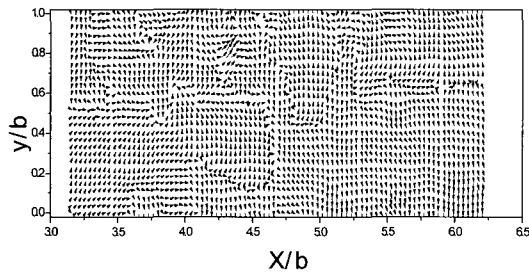


Fig. 20 Mean velocity vectors along the test tube for  $Re=0.62$  with D.C 1.5kV/mm.

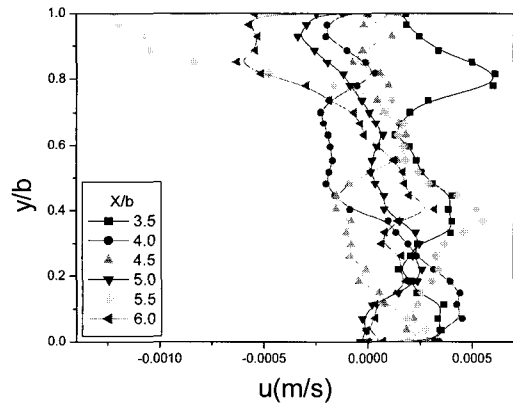


Fig. 21 Velocity distributions along the test tube for  $Re=0.62$  with D.C 1.5kV/mm.

Fig. 6, 11, 15, 18 그리고 Fig. 21은 ER유체가 저장탱크에서 위치에너지 차이에 의하여 일정한 방향으로 흐르는 상태에서 인가전압을 가하여 측정된 축방향 속도분포이다. 이 축방향 평균속도로부터 구한 Reynolds 수는 인가전압이 " 0 "인 경우는 2.267, 인가전압이 " 0.5kV/mm "에서는 2.077, " 1.0kV/mm "에서는 1.29 그리고 " 1.5kV/mm "에서는 0.62로 나타났다. 이와 같은 결과로 볼 때 인가 전압이 증가하면서 클러스터의 형성이 증가되어 유체의 유동량은 감소하여 Reynolds 수가 저하하는 현상을 나타내었다.

### 결 론

본 연구에서는 PIV 기법을 이용하여 ER유체의 유동 가시화 실험을 수행하였으며, 화상입력장치를 이용하여 입자의 변위를 계측함으로써 속도분포를 얻고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전기장의 강도에 따라서 전극에 부착하는 클러스터는 굵어지고 길어지며 ER유체의 흐름 중에 형성된 클러스터 또는 클러스터의 결합력이 유동저항으로 나타나고, 전기장에 의하여 형성된 클러스터에 의해 ER유체의 속도분포 및 유량이 변화하는 것을 알 수 있었다.

(2) 유로 내에 형성된 띠 형태의 클러스터는 한번 형성된 후 그 형태를 지속적으로 유지하는 것이 아니고, 파괴와 생성의 과정을 짧은 주기로 반복하는 것을 알 수 있었다. 그러나 유속이 작은 경우에는 전극 근방에서 형성된 클러스터가 유로 중앙부근에까지 형성되며, 유속이 점차 증가함에 따라서 유로 중앙부의 클러스터는 파괴되는 것을 알 수 있었다.

(3) 유로를 흐르는 ER유체는 전기장의 강도에 따라 (+), (-) 전극에 생성되는 클러스터의 양이 변하게 되며, 유로 중앙부에서 전류 영역이 생기는 것을 확인할 수 있었다.

(4) Reynolds 수와 인가전압의 관계는 인가전압이 증가하면서 클러스터의 형성이 증가되어 유체의 유동량은 감소하고 Reynolds 수가 저하하는 현상을 나타내었다.

## 후 기

본 연구는 경남대학교 2003학년도 학술논문 게재 연구비로 이루어졌습니다.

## Reference

- [1] K. C. Wang, R. Mclay and G. F. Carey, ER Fluid Modelling, CFD Laboratory, College of Engineering, University of Texas at Austin, Austin, Tx, USA. Proc. of the Second International Conference on ERF, pp. 41~52, 1989.
- [2] A. J. Simmonds, "Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit", IEE Proceeding-D, Vol. 138, No. 4, pp.400~404, 1991.
- [3] D. A. Brooks, "Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices", Journal of Modern Physics, Vol. 6, pp.2705~2730, 1992.
- [4] Tetsuhiro Tsukiji, Jun Takahashi, Noboru Sugimoto, Hiroyasu Ikeda., "Flow Characteristics of ERF between Two Parallel-Plate Electrodes", 日本油壓と空氣壓學會志, 第 25卷 第4號 pp. 104~561, 1996年 7月
- [5] S. Yokota, Y. Kondoh, "A Control valve by Making use of an ER Fluid", 日本機械學會論文集, 第 62卷 601號 pp. 3471~3478, 1996.
- [6] 전영식, "전극길이 변화에 따른 실린더 형태 ER밸브의 성능 고찰", 한국공작기계학회지 제7권 제6호, pp. 1~11, 1998.
- [7] 박명관, 이은준, 大島修造, 山根隆一郎, "좁은 평행평판전극 사이의 ER유체 유동의 가시화", 대한기계학회논문집 B권 제23호 제7호, pp. 801~ 810, 1999.
- [8] 장성철, 염만오, 김도태, "평행평판의 전극형상에 따른 ER유체의 유동특성", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 207~212, 2000.
- [9] 장성철의 3인 "좁은 평행평판 전극사이에서 ER유체 유동의 가시화", 한국기계기술학회지 논문집, pp.129~135, 2001.
- [10] 장성철, 염만오, 김도태, "평행평판 간극내에서 전기장 강도에 따른 분산계 ER유체의 유량-압력강하 특성", 한국공작기계학회지, 제 12권, 제 1호, pp. 78~83, 2003.
- [11] M. Nakano and T. Yonekawa, "Pressure Response of ER Fluid in a Piston Cylinder ER Valve System", Proc. of the 4th Int. Conf. on Electrorheological Fluid, pp.477~489, 1994
- [12] S. B. Choi, C. C. Cheong, "Performance Investigation of a Cylindrical Valve Featuring Electro-Rheological Fluids", Korean Society of Precision Engineering, Vol. 11, pp. 148~157, 1994.

## 저 자 소 개



## 장태현 (張泰鉉)

1942년 2월생, 1969년 동아대학교 기계공학과 졸업, 1971년 동대학대학원 기계과 졸업(공학석사), 1991년 12월 University of Wales(Swansea, U.K.) 대학원 기계공학과 졸업(Ph.D), 2001년 5월 제6차 ASV'6(Asian Symposium on Visualization) 조직위원장 역임, 공조·냉동기계 기술사, 현재 경남대학교 기계자동화공학부 교수