

## 단일입자층 현탁액내에서 입자이동에 관한 연구

원대진, 이상왕, 김종엽  
충남대학교 고분자공학과

### Alignment of particles in suspensions between two parallel plates with the gap distance of one particle diameter

Dae Jin Won, Sang Wang Lee, Chongyoun Kim  
Department of Polymer Engineering, Chungnam National University

#### 서론

현탁액내 입자간의 상호작용은 현탁액의 유변학적물성을 결정하는 중요한 인자의 하나이나 비뉴턴성유체내에 분산된 입자간의 상호작용에 관하여는 현재까지 많은 연구가 보고되고 있지 못하다. 더욱이 유변학적인 특성이 잘 알려져 있는 Boger 유체 내에서의 단일구의 유동에 대한 연구결과조차 Boger 유체 내에서의 항력이 뉴턴성유체내에서의 항력에 비하여 증가하는 경우와 감소하는 경우가 모두 보고되고 있다. 이러한 문제는 현재까지 사용된 Boger 유체, 즉 PIB/PB, PS/PS, PAAm/Corn syrup Boger 유체의 연신유동특성이 서로 다르기 때문인 것으로 예측되고 있다. 고분자용액에 분산된 현탁액내에서 입자간 상호작용은 입자의 배열과 응집을 유도하는 것으로 잘 알려져 있다. Joseph and Feng(1996)은 2차유체를 대상으로 두 입자의 축방향 이동을 해석하여 2개의 입자가 서로 가까워짐을 보였다. 이러한 결과는 입자의 1차원적인 배열, 즉 사슬구조가 형성될 수 있는 기본적인 메커니즘으로 연결될 수 있다.

현재까지 입자의 사슬구조 형성에 관하여는 Michele 등(1977)이 단 입자층 및 Poiseuille 유동을 대상으로 한 실험이 가장 대표적으로 알려져 있다. 이후 Jefri and Zahed(1989)도 비뉴턴성유체의 Poiseuille 유동장에서 입자의 사슬구조 형성을 관찰하였다. 그러나 이러한 사슬구조의 형성에 관하여 유변학적인 물성과 연관하여 체계적인 연구가 수행되지는 못하고 있다. 또한 고분자용액의 Couette 유동의 경우 사슬구조가 형성되거나 응집이 일어나지 않는 경우도 보고되고 있다(Kim et al., 2000). 본 연구에서는 고분자용액내에서 사슬구조 또는 응집구조가 형성되는 조건을 밝히기 위한 첫 번째 단계로서 단일입자두께의 유체 층의 전단장내에서 여러 가지 유변학적 물성을 갖는 유체에 입자를 분산시킨 현탁액을 대상으로 사슬구조형성에 대한 실험적인 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과 유체의 탄성이 강할수록, 점도의 shear thinning 현상이 강할수록 사슬구조가 강하게 형성됨을 알 수 있었다. 유체의 탄성이 약한 저전단율 유동에서는 사슬구조가 형성되지 않으며, 사슬구조형성의 중간단계로서 입자가 등간격으로 배치되는 것을 볼 수 있었다.

#### 실험

실험장치는 단순전단유동장치와 회전원판장치의 2종류를 제작하였다. 단순전단 유동장치는 그림 1에 보인바와 같이 두 개의 평행한 유리판과 Microstepping motor/Linear motion guide 계를 구성하고, 이중 하나의 유리판을 원하는 속도로 병진이동 시킬 수 있도록 하였다. 병진 운동은 장치의 한계 상 지속적으로 계속하여 정상상태에 도달하기 어려우므로 sine wave 형태의 진동실험을 실시하였다. 자석과 강철판을 사용하여 두 유리판의 간격이 입자의 직경과 거의 일치하도록

록 하였다. 회전원판장치는 그림 2에 보인바와 같이 유변물성측정장치로서 일반적으로 사용되는 평행원판형태로 제작하되 두 원판사이의 간격이 일정하게 유지되도록 단순전단유동장치와 같이 자석과 강철판을 이용하였다.

현탁액의 분산매로는 에틸렌글리콜과 글리세린을 혼합한 뉴튼성유체, 뉴튼성유체에 분자량 500만의 polyacrylamide(PAAm)를 5000ppm 용해한 유체 및 50%의 설탕물에 2000ppm의 xanthan gum(XG)을 용해한 용액을 사용하였다. PAAm 용액은 탄성을 가지면서 거의 일정한 점도를 나타내는 Boger 유체의 성질을 나타내며, XG 용액은 강한 shear thinning 현상을 나타내는 특징이 있으므로 용액의 탄성 및 shear thinning 현상의 역할을 검토하기에 적당하였다. 용액의 유변학적 물성은 ARES를 이용하여 측정하였다.

입자로는 표준체로 분리한 300-355 micron의 구형 PMMA 입자를 사용하였다. 관찰이 용이하도록 흑색의 분산염료로 염색을 하였다. 현탁액의 농도는 10%로 고정하여 실험하였다.

### 결과 및 고찰

그림 3에는 PAAm용액에 분산된 현탁액의 1차원 진동실험의 전형적인 결과를 도시하였다. 초기에 임의로 분산된 입자가 20mm 길이를 4회 왕복 후에는 정렬을 하게 되는 것을 볼 수 있다. 그러나 입자사이의 간격이 유지가 되며, 11회 반복 후에도 많은 입자들이 어떤 사슬에 속하지 않고 독립적인 위치를 유지하고 있다. 그림 4에 보인 XG용액에 분산된 현탁액의 경우에는 초기에 임의로 분산된 입자가 4회 왕복 후 PAAm 용액의 경우보다 정렬정도가 더 강한 것을 볼 수 있으며, 11회 왕복 후에는 거의 대부분의 입자들이 사슬의 일부로서 포함되면서 강한 미세구조가 생기는 것을 볼 수 있다. 그림 5에는 뉴튼성 분산매 내에서 20회 왕복 후에도 정렬이 되지 않고 임의로 배열됨을 볼 수 있다. 이러한 결과로 볼 때 용액내에서의 입자들이 사슬구조를 형성하는 것은 용액의 탄성뿐만 아니라 shear thinning 한 현상에 의하여도 강한 영향을 받는 것을 알 수 있다. 한편 본 실험 및 Michele 등의 실험은 단일입자두께의 단순 전단장으로서 전단율이  $50 \text{ sec}^{-1}$ 의 비교적 큰 값을 갖는 경우이다. Kim 등의 실험에서 이러한 사슬구조 혹은 응집이 일어나지 않은 것은 그들의 전단율이  $2 \text{ sec}^{-1}$  범위에 있고, 용액의 점도가 거의 일정한 Boger 유체를 사용하였기 때문인 것으로 예상된다. 특히 회전운동으로 입자가 일직선상의 배열하기가 어려운 점도 있었던 것으로 생각된다.

회전원판사이의 유동에서도 입자배열의 정도는 XG 용액에서 더 강하게 형성되는 것을 볼 수 있었으며, 정성적으로는 단순전단장에서의 결과와 같았다. 그러나 이 경우에는 시간이 지남에 따라서 입자가 서서히 원판의 가장자리로 이동됨을 관찰할 수 있었다. 이러한 이동은 원판간의 간격이 입자의 지름보다 큰 경우에도 입자가 가장자리로 이동되는 것과 (Ryu et al., 2000) 동일한 메커니즘에 의한 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- Joseph, D.D and J. Feng, 1996, *JNNFM* **64**, 299.  
 Jefri, M.A. and A.H. Zahed, 1989, *J. Rheol.* **33**, 691-708.  
 Kim, S., M. Han and C. Kim, 2000, *Rheologica Acta* **39**, 495-502.  
 Michele, J., R. Paetzold and R. Donis, 1977, *Rheologica Acta* **16**, 317-321.  
 Ryu, S.H., S.W. Lee and C. Kim, 2000, *Theories and Appl. Chem. Eng. (Prod. KICHe 2000 Fall Mtg.)* **6(2)**, in CD-ROM, Pohang.

### 감 사

본 연구를 지원해주신 유변공정연구센터(한국과학재단ERC)에 감사드립니다.

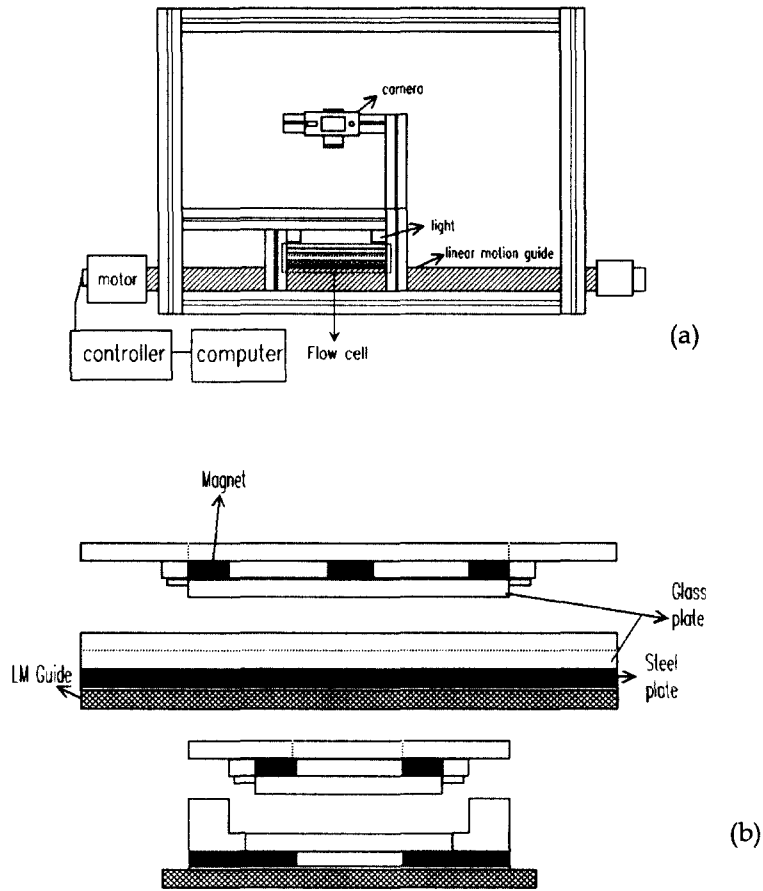


그림 1. 직선왕복운동 실험장치의 개략도.  
 (a) 장치; (b) Flow cell. Upper pair: side view; Lower pair: front view

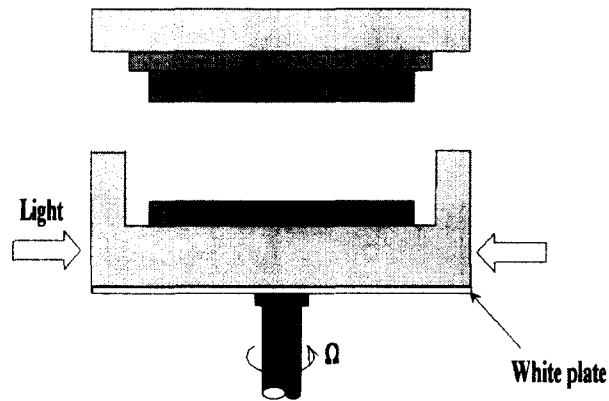


그림 2. 회전원판 실험장치의 개략도

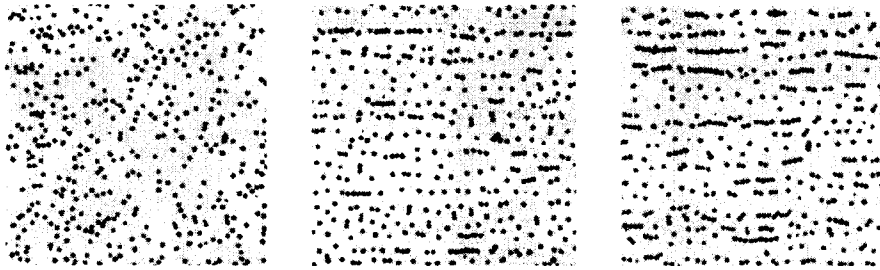


그림 3. PAAm 용액내에서의 입자의 이동.  $V_{max} = 15\text{mm/s}$ , 이동거리 20 mm 좌로부터 초기, 4회왕복후, 11회 왕복후.

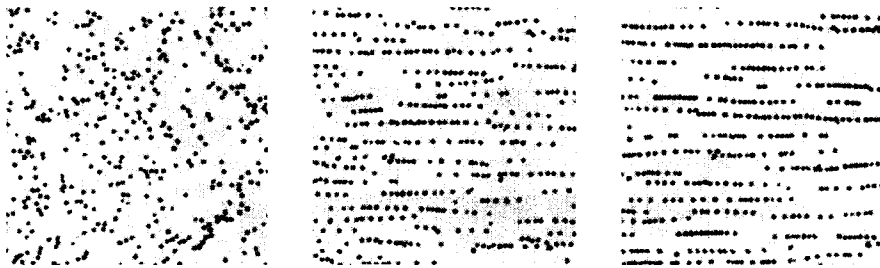


그림 4. XG 용액내에서의 입자의 이동.  $V_{max} = 15\text{mm/s}$ , 이동거리 20 mm 좌로부터 초기, 4회왕복후, 11회 왕복 후.

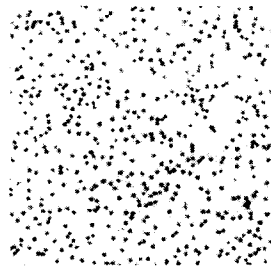


그림 5. 뉴튼성유체내에서의 입자의 이동. 20회 왕복 후에도 임의배열을 유지함.