

## 현탁액의 회전원판-컵 장치내 유동에서 입자이동에 관한 연구

류승희, 이상왕, 김종엽  
충남대학교 고분자공학과

**Migration of particles in suspensions between two parallel plates  
with a walled lower-plate**

Seunghee Ryu, Sang Wang Lee, Chongyoup Kim  
Department of Polymer Engineering, Chungnam National University

**서** **론**

현탁액의 유변물성측정시 점도계 내 입자들의 이동과 복잡한 거동으로 측정의 어려움을 겪게된다. 이러한 입자농도의 불균일성은 불균일한 유동장에서 현탁된 고체입자들이 여러 가지 메커니즘에 의하여 유선에 수직한 방향으로 이동하기 때문인 것으로 알려져 있다. 현재까지 뉴튼성유체를 기본으로 한 현탁액내의 입자이동에 관하여는 Gadala-Maria and Acrivos(1980)의 선구적인 보고이래 실험적 및 이론적으로 연구된 바가 있었으며, 최근에는 MRI를 이용한 비파괴적인 입자농도 및 속도측정 기술에 힘입어 입자농도 분포의 정량적인 분석과 함께 입자이동의 메커니즘도 연구되고 있다.

뉴튼성유체에 분산된 진한현탁액의 경우 회전형 평행원판장치 내에서는 반경방향의 입자이동이 관찰되지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서 뉴튼성유체 현탁액의 경우 점도와 같은 유변학적 물성을 측정하기 위해서는 평행원판장치가 가장 적절한 것으로 생각된다. 회전형 원판장치를 사용하는 경우 현탁액의 경우 표면장력이 작기 때문에 원판의 가장자리에서 축대칭형의 표면이 형성되지 못하며, 현탁액이 흘러내리는 등의 문제가 발생하는 경우가 많다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 아래 원판에 테를 붙이는 방법이 사용되기도 한다. 이러한 방법은 아주 묽은 용액을 다루는 경우, 특히 chemorheology에서 아주 묽은 단량체로부터의 경화거동측정 시 사용되고 있으며, 표면장력이 작은 유체의 수직응력을 측정하는 경우에도 사용되고 있다.

Vrentas 등(1991)은 cup, 즉 벽을 설치한 아래 쪽 원판의 반경이 크고 ( $R_{cup}/R > 1.1$ ), 원판간의 간격이 작은 경우 cup의 반경의 역할은 무시할 수 있으며, 이때 작용되는 토크와 벽이 없는 경우의 토크의 비는

$$\frac{M_{wall}}{M_0} = 1 + 1.9 \frac{h}{R}$$

로 표시됨을 보였다. 위 식에서  $M$ 은 토크,  $h$ 는 원판간의 거리,  $R$ 은 원판의 반경을 나타낸다. 물론 이 식은 유체가 균일한 경우에 사용될 수 있는 식으로서 현탁액과 같이 입자의 이동이 있는 경우에는 전혀 다른 결과가 생길 수 있다. 특히 벽이 있는 경우에는 벽 근처의 전단율이 낮기 때문에 입자가 모이게 되므로 뉴튼성유체에 분산된 현탁액에서도 반경방향의 이동이 생길 수가 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 검토하기 위하여 회전원판사이에서 현탁액내 입자들의 이동에 관한 연구를 수행하였다. 뉴튼성유체와 비뉴튼성 유체에 10-30%의 입자를 분산시킨 현탁액을 제조하고, 투명한 아크릴로 제작한 parallel plate내에서 유동현상을 관찰하였다. 아래 원판은 벽이 있는 경우와 없는 경우를 제작하여 두 경우를 비교하였다. 실험 결과 뉴튼성 분산매로 제조한 진한 현탁

액의 벽이 없는 경우 유동에서는 입자가 균일한 분포를 나타내는 반면, 벽이 있는 경우에는 반경방향의 입자이동으로 불균일한 입자농도 분포가 형성됨을 볼 수 있었다. 입자농도가 낮은 경우에는 모두 반경방향의 이동이 생겨 정량적인 결론을 내리기는 곤란하였으나 정성적인 차이는 관찰되었다. 비뉴턴성 분산매의 현탁액의 경우에도 벽의 존재 여부에 따라 입자농도 분포가 다르게 형성됨을 볼 수 있었다.

## 실 험

본 연구에서는 분산매로서 입자와의 밀도를 동일하게 맞추기 위해 에틸렌글리콜과 글리세린을 52:48의 비율로 혼합한 뉴턴성유체와, 여기에 분자량 5백만의 시약용 PAAm(Aldrich Chem.)을 5000ppm 용해시킨 고분자용액을 각각 사용하였다. 구형입자로는 PMMA입자를 사용하였다. 균일한 입자를 얻기 위해 표준체(Standard Sieve)를 이용하여 90-106 $\mu$ m 크기의 입자를 분리하여 사용하였다. 입자의 형태를 알아보기 위해 40-100 배율의 광학현미경으로 관찰한 결과 완전한 구형임을 확인할 수 있었다.

실험장치는 parallel plate, motor, camera, 원형 형광등으로 구성하였다. parallel plate는 유체의 거동을 관찰하기 위해 투명한 아크릴로 제작하였으며, 벽면효과를 배제하기 위해 그림 1처럼 가장자리에 공간을 두는 경우와 공간을 두지 않는 2가지를 제작하였다. Motor는 controller를 부착하여 전단율을 조절할 수 있도록 설치했다. Parallel plate에 유체를 채운 후, 윗판을 고정시키고 일정한 전단율로 아랫판을 돌렸을 때 유체의 변화를 camera로 찍었다. Parallel plate 바닥에 검정색판을 부착하여 사진에서 입자가 적으면 어둡게, 많으면 밝게 나타나도록 하였다.

## 실험 결과 및 고찰

그림 2에는 뉴턴성유체에 분산된 현탁액의 입자이동에서 벽효과를 검토한 사진을 도시하였다. 입자농도가 30%이고 벽이 없는 그림 2a의 경우에는 정상상태에서는 입자가 거의 균일하게 분포된다(그림에서 중앙이 가장자리에 비하여 밝은 것은 조명의 문제인 것으로 생각된다). 그러나 벽이 있는 그림 2b의 경우에는 중앙에 흰 부분이 나타난다. 그림으로 이 부분에 입자가 모여 있는 것으로 보이나 실제로는 입자는 정지된 위 원판에 단층으로만 붙어 있고 아래쪽에는 거의 입자가 없는 것을 볼 수 있었다. 그림 3a, 3b에는 입자농도가 20%인 경우 정상상태에서의 입자농도분포를 도시하였다. 이 경우에도 입자가 가운데 부분에 단층으로 모이는 것을 볼 수 있으나, 벽의 유무에 따라 그 크기가 다른 것을 볼 수 있다. 이 경우에는 중앙에는 입자가 거의 보이지 않는 특징도 있으며 벽이 없는 경우 더욱 선명하게 나타난다. 이러한 그림 2 및 3의 입자농도 분포는 물론 현탁액의 유동이 축대칭을 유지하지 못하고 toroidal cell이 형성되기 때문이며, 일한 vortex는 벽의 유무에 따라 그 크기가 달라지게 되는 것으로 판단된다. 특히 중앙에 입자가 없어지는 20% 현탁액의 경우에는 다수의 toroidal cell이 형성되는 것으로 보인다.

고분자용액에 분산된 현탁액의 경우에도 벽의 유무에 따라 다른 결과가 나타난다. 고분자용액에 분산된 현탁액은 정상상태로 가는 과정이 단조적이지 않고 다수의 toroidal cell이 생기는 것이 보고되고 있다. 따라서 벽의 유무에 따라 비정상상태의 입자농도 분포도 매우 복잡한 과정을 거치게 된다. 그림 4a, 4b에는 5000 ppm PAAm 용액에 분산된 현탁액의 정상상태에서의 입자농도 분포사진을 도시하였다. 그림 4a에서 입자는 반경방향으로 연속적으로 분포하는 것을 볼 수 있으나 4b에서는 단계적인 분포를 갖는 것을 볼 수 있다. 즉 4a의 경우에는

정상상태에서 toroidal cell 형성되지 않고 축대칭유동이 형성되나 4b의 경우에는 강한 toroidal cell이 형성되는 것을 볼 수 있다. 또한 4a의 경우에는 원판의 가장자리에서 현탁액의 fracture 현상도 관찰된다. 물론 이러한 현상을 회피하기 위하여 벽이 있는 원판을 사용하기도 한다.

이상에서 볼 때 유체의 종류에 관계없이 벽의 유무에 따라 유동형태가 정성적으로 달라짐을 알 수 있다. 특히 toroidal cell의 존재는 회전원판형 레오미터로서도 현탁액의 점도를 측정하는 데 문제가 있음을 생각할 수 있다. 이러한 문제는 고분자용액에 분산된 현탁액의 경우 보다 강하게 나타나지만 뉴턴성유체에 분산된 현탁액에도 문제가 된다. 현탁액의 점도의 측정, 특히 충분히 진하지 않은 현탁액(semi-dilute suspension)의 경우 이러한 문제는 더욱 심각하게 나타날 수 있다. 한편 본 연구실에서는 이러한 문제에 대하여 MRI를 이용하여 입자농도를 정량적으로 측정하는 실험을 병행하고 있으며, 이러한 문제에 대하여 앞으로 이론적인 해석이 병행되면 현탁액의 구성방정식과 입자이동을 이해하는 데 이용될 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- Gadala-Maria, F., A. Acrivos, 1980, *J. Rheol.*, **24**, 799.  
 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.  
 Vrentas, J.S., Venerus, P.C. and C.M. Vrentas, 1991, *Chem. Eng. Sci.* **46**, 33.

#### 감 사

본 연구를 지원하여주신 유변공정연구센터(한국과학재단ERC)에 감사드립니다.

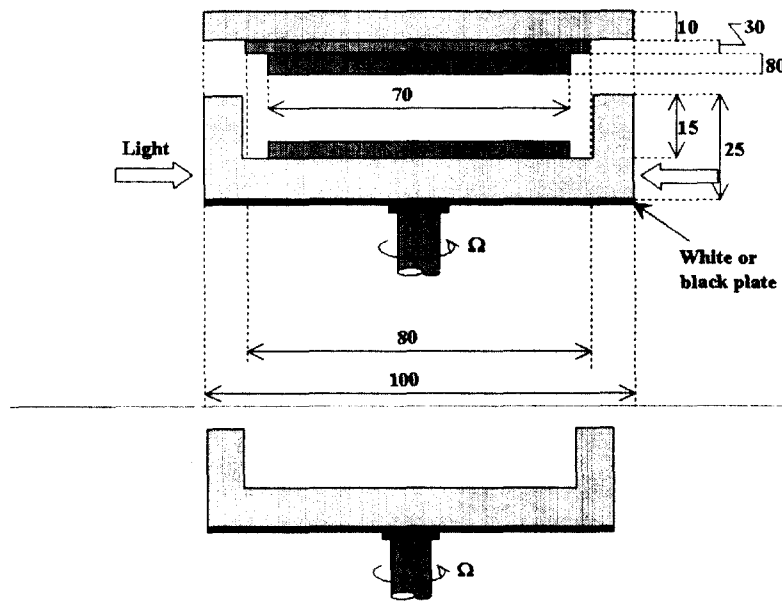


그림 1. 실험장치(parallel plate) 개략도. 위: 전체 개략도 및 벽이 없는 아래판  
 아래: 아래 원판에 벽이 있는 경우.

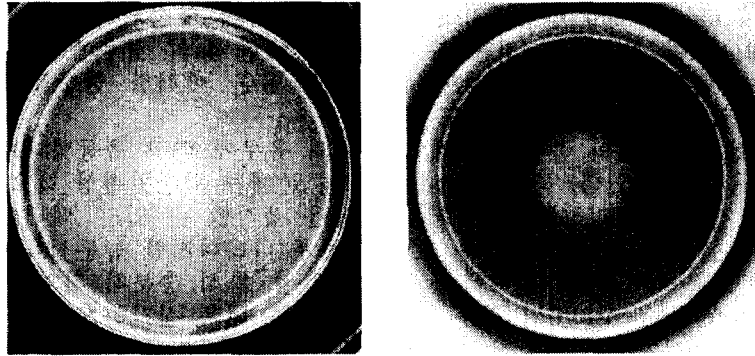


그림 2. 뉴턴성유체 현탁액. 입자농도 30%.  
좌(a): 벽이 없는 경우; 우(b): 벽이 있는 경우

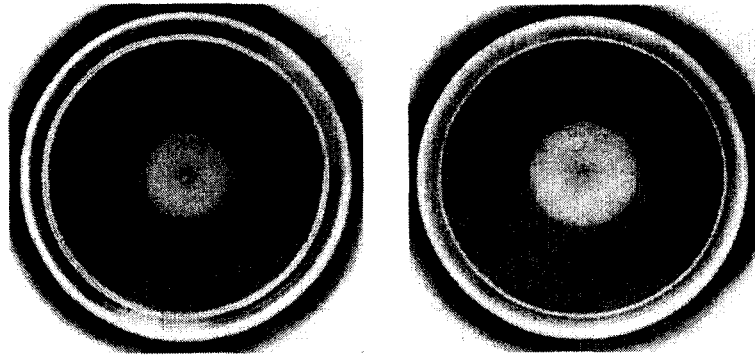


그림 3. 뉴턴성유체 현탁액. 입자농도 20%.  
좌(a): 벽이 없는 경우; 우(b): 벽이 있는 경우

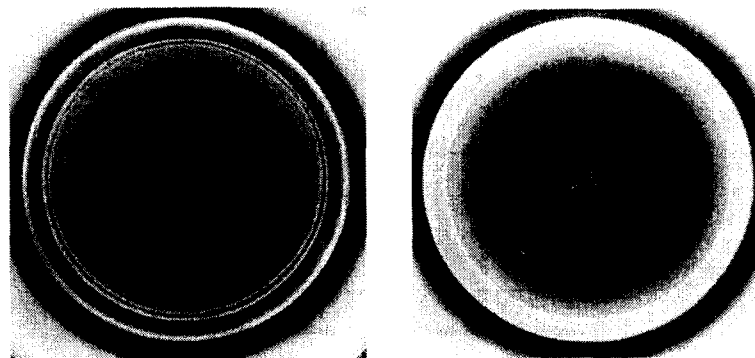


그림 4. PAAm 5000ppm 용액에 분산된 현탁액. 입자농도 20%  
좌(a): 벽이 없는 경우; 우(b): 벽이 있는 경우