

## 회전평판 사이 현탁액 내 입자 이동에 관한 연구

김중엽, 이송근  
고려대학교 화학공학과

## Migration of spherical particles in suspensions under torsional and oscillatory flows between two parallel plates

Chong Youp Kim, Song Geun Lee  
Dept. of Chemical Engineering, Korea University

## 서론

현탁액의 유변물성 측정 시 점도계 내 입자들의 이동과 복잡한 거동으로 측정에 어려움을 겪게 된다. 이러한 입자농도의 불균일성은 불균일한 유동장에서 현탁된 고체입자들이 여러 가지 mechanism에 의하여 유선에 수직한 방향으로 이동하기 때문인 것으로 알려져 있다. 현재까지 Newtonian fluids를 기본으로 한 현탁액 내의 입자이동에 관하여는 Gadala-Maria and Acrivos(1980)의 선구적인 보고 이래 실험적 및 이론적으로 연구된 바가 있었으며, 최근에는 MRI를 이용한 비파괴적인 입자농도 및 속도측정 기술에 힘입어 입자농도 분포의 정량적인 분석과 함께 입자이동의 mechanism도 연구되고 있다.(Kim, Han, 1999 J. Rhology)

현탁액의 유변물성을 측정하기 위한 장치들로는 cone-plate viscometer, Couette viscometer, capillary viscometer, parallel plates viscometer, vane viscometer 등이 있다. 그러나 현탁액의 유변물성 측정 시 점도계 내 입자들의 이동과 복잡한 거동으로 측정에 어려움을 겪게 된다. Parallel plates viscometer의 경우 wall effect는 있지만 Newtonian 현탁액에 대한 수력학적 확산은 무시할 만하여 parallel plates viscometer는 Newtonian 현탁액의 유변물성 측정에 적합하며 많은 연구가 있어 왔다.

Chow 등(1994)은 NMRI 기술을 이용하여 parallel plates에서 0.50 부피 분율의 구형입자가 분산된 Newtonian fluid의 입자 이동을 관찰한 결과, 입자 이동은 있으나 그 방향이 반경 방향은 아니라는 사실을 확인하였다. Prieve 등(1985)은 plate에서 고분자 용액 내 단일 입자 이동에 관한 실험을 수행하였으며, 그 결과 critical distance 안쪽과 바깥쪽에서의 입자 움직임이 다름을 관찰하였다. Krishnan 등(1996)은 염색된 PMMA 입자들을 굴절율을 맞춘 혼합 용액에 분산시켜 parallel plate에서 shear stress를 가하여 실험한 결과 큰 입자들은 shear stress가 큰 plate의 가장자리로 이동함을 관찰하였다. 그러나 위와 같은 결과들의 대부분은 Newtonian 현탁액에서의 실험이었으며, 실험방법 또한 체계적으로 정리되지 못한 것이 사실이다. 아울러 위의 실험 대부분은 정성적 분석이거나 입자를 넣은 후에 정확한 유변학적 data가 없다.

본 연구에서는 두 평판 사이의 Non-Newtonian Fluids에서 각각의 경우 particle volume percent( $\Phi$ ), shear rate를 변수로 채택하여 입자 이동과 그에 따른 torque, normal stress 변화를 관찰하였다. 또한 이제까지 연구되지 않았던 oscillation test mode에서의 입자 이동도 관찰하였다. 이를 위해 Newtonian fluids와 Non-Newtonian fluids에 입자를 분산시킨 현탁액을 제조하고, AR2000 (TA instrument) 장치의 parallel plate(acryl)내에서 유동 현상을 관찰하였다. 실험 결과 Newtonian 분산매의 현탁액은 일정 shear rate하에서도 shear rate을 가하기 전과 마찬가지로 입자가 균일한 분포를 나타내는 반면, Non-Newtonian 분산매의 현탁액은 입자들이 plate의 가장자리로 서서히 이동함을 관찰할 수 있었다. 입자가 가장자리로 이동함에 따라 torque는 조금씩 증가하는 것을 알 수 있었다.

### 실험방법

본 연구에서는 분산매로서 입자와의 밀도( $1.18\text{g/cm}^3$ )를 동일하게 맞추기 위해 ethylene glycol과 glycerin을 52:48의 비율로 혼합한 Newtonian fluids에 분자량 5백만의 시약용 PAAm(Aldrich Chem.)을 용해시킨 polymer solution과 Xanthane gum 2000ppm에 sugar를 58.4:41.6의 비율로 혼합하여 밀도를 맞춘 polymer solution을 각각 사용하였다. 구형입자로 PMMA입자를 사용하였다. 균일한 입자를 얻기 위해 표준체(Standard Sieve)를 이용하여  $150\text{-}180\mu\text{m}$  입자를 분리하여 사용하였다. 또 visualization을 위해 입자를 분산 염료를 사용하여 검은색으로 염색을 하였다. 입자의 형태를 알아보기 위해 40-100 배율의 광학현미경으로 관찰한 결과 완전한 구형입을 확인할 수 있었다.

실험장치는 AR2000 (stressed control rheometer), parallel plate, digital camcorder (DCR-VX2000, Sony)와 이를 촬영하기 위해 제작한 장치로 구성하였다. Parallel plate는 지름 6cm에 acryl로 된 것을 사용하였고, 수분의 증발과 흡수를 방지하기 위해 solvent trap과 vacuum grease를 사용하여 완전히 밀봉하였다. 그리고 solvent trap 내 용액으로는 PAAm 용액에 silicon oil(1cs)를, Xanthane gum+sugar용액에는 ethyl alcohol을 넣어서 사용하였다. 이로 인해 용액 처음 상태를 유지할 수 있어서 더욱 정확한 실험을 수행할 수 있었다. Parallel plate에 유체를 loading한 후, 아랫판은 고정되고 일정한 shear rate으로 윗판을 돌렸을 때 입자와 유체의 변화를 digital camcorder로 촬영하였다. Parallel plate아래에는 AR2000 장치의 plate를 개조(그림 1)하여 유동을 직접 밑에서 관찰하였다.

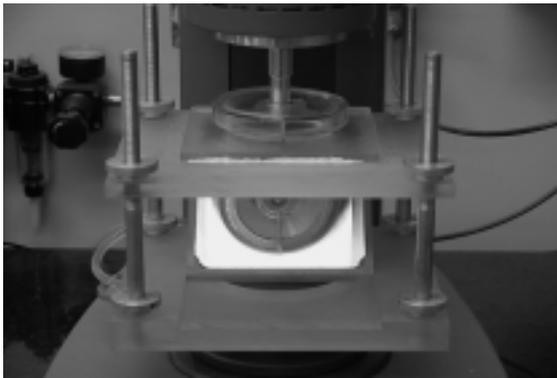


그림1. 유동의 관찰을 위해 개조한 AR2000 실험 장치

### 결과

Newtonian fluids내에서의 입자이동을 관찰하기 위해 ethylene glycol+glycerin 용액에 10%의 PMMA를 첨가하여 실험하였다. 그 결과 반경방향의 이동이 없고 입자가 균일한 분포를 보인다. 또, Non-newtonian fluids내에서의 입자이동을 확인하기 위해 입자농도 10% PAAm 5000ppm, 2000ppm과 Xanthane gum 2000ppm+sugar 현탁액에서 각각 실험한 결과, 그림 2와 같은 현상이 관찰되었다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, Non-Newtonian fluids의 현탁액은 plate 중심의 입자가 밖으로 서서히 이동하면서 중심부에 약간의 입자들이 모이는 것을 볼 수 있었다. 이는 입자들이 Non-Newtonian effect에 의해 plate rim으로 이동하려는 경향에 의해 나타나 생기는 현상으로 볼 수 있다. 입자의 torque와 normal stress를 관찰해보면, 입자가 밖으로 나가는 것이 관찰되고, torque는 커지는 것을 볼 수 있다. 이와는 반대로 입자가 가운데로 들어오면서 torque는 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 또 normal force는 plates 사이에서 입자들이 tumbling 하면서 oscillation하는 것을 알 수 있다. 그림 2(상)에서 보듯이 PAAm 5000ppm의 실험에서는 입자들이 거의 다 밖으로 나가고, torque는 증가하는 것을 볼 수 있고, 이와는 반대로, PAAm 2000ppm(그림 2(중))의 실험에서는 입자의 반 이상이 안쪽으로 들어오고, torque는 감소하는 것을 볼 수가 있다.

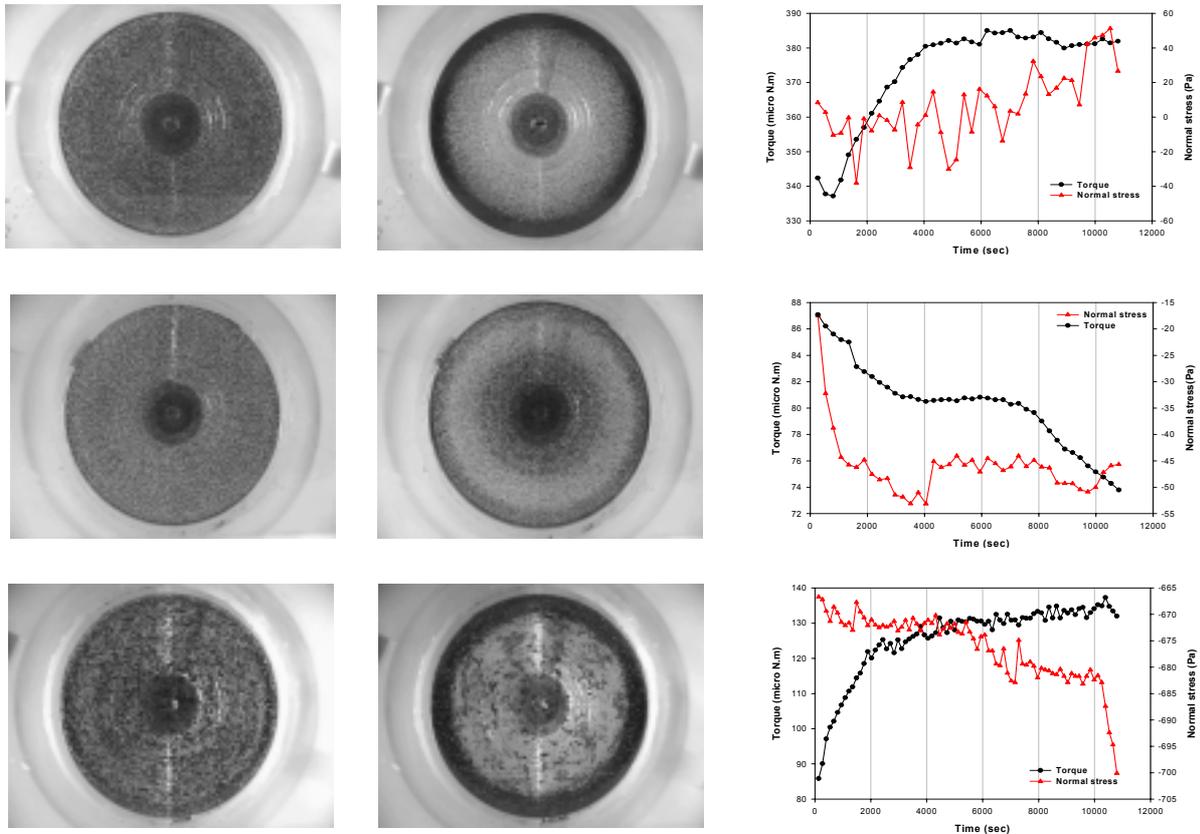


그림 2. shear rate  $10s^{-1}$ ,  $\phi=10\%$ , gap= $1600\mu m$

상 : PAAm 5000ppm (좌 : 시작 우 : 10800초(3시간) 후)

중 : PAAm 2000ppm (좌 : 시작 우 : 10800초(3시간) 후)

하 : Xanthane 2000ppm + sugar (좌 : 시작 우 : 10800초(3시간) 후)

또, 입자를 넣기 전과 넣은 후의 torque와 normal stress data를 비교하였고, 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, 입자를 넣었을 때는 torque 값이 100micro N.m 정도 증가하다가 입자들이 밖으로 나가면 거의 일정하게 유지되거나 약간 떨어지는 경향을 볼 수가 있다.

Non-Newtonian fluids에서는 입자가 반경방향으로 이동하므로, torque와 Normal stress를 측정하는 경우 실제 물성을 얻기가 불가능함을 알 수가 있다. 따라서 이는 visualization과 같이 병행해야 하는 것을 의미한다. 이런 결과로 현탁액의 유변물성 측정에 많이 이용되는 parallel plate는 고분자 현탁액의 유변물성 측정시 입자의 반경방향으로의 이동 때문에 고분자 분산매에 분산된 현탁액의 유변물성 측정에는 적당하지 않음을 알 수 있었다.

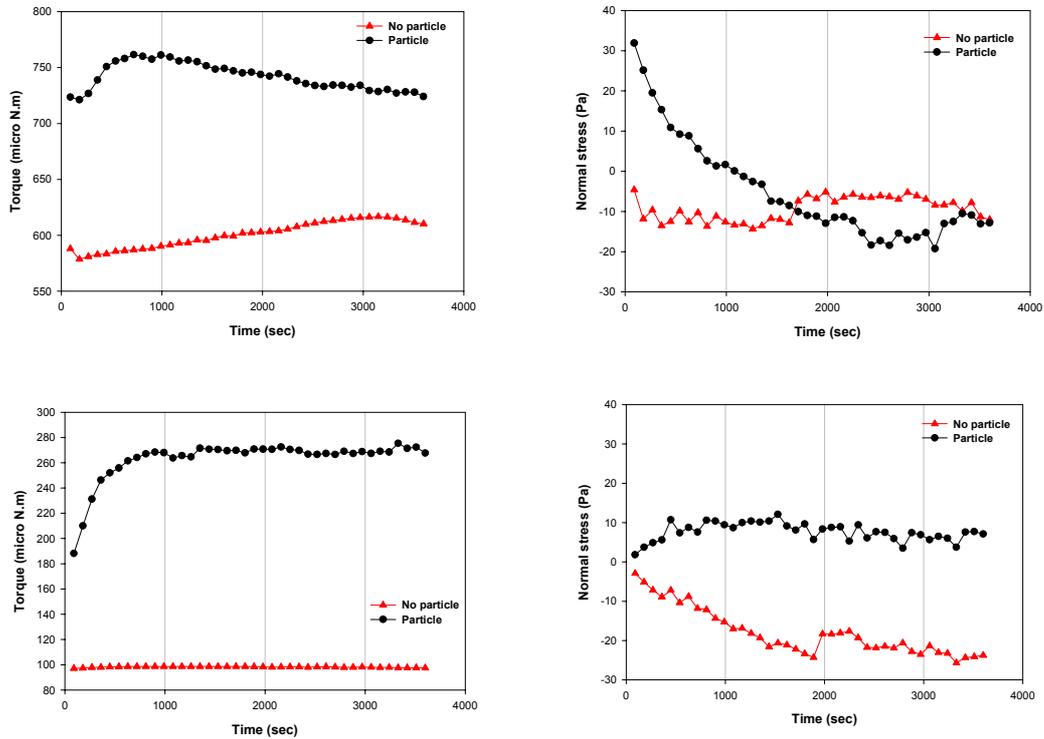


그림3. Particle을(10%)을 첨가했을 때와 첨가하지 않았을 때의 torque, normal stress 비교  
 상 : PAAM 5000ppm, shear rate 30 s-1 일때의 비교 (좌: torque, 우: normal stress)  
 하 : Xanthane 2000ppm+sugar, shear rate 30 s-1 일때의 비교 (좌: torque, 우: normal stress)

### 참고문헌

1. Chow, A.W., Sinton, S.W. and Iwamiya, J.H., *Phys. Fluids*, **6**, 2561(1994).
2. Gadala-Maria F., Acrivos A., *J. Rheol.*, **24**, 799,(1980).
3. Ho B.P., Leal L.G. *J. Fluid Mech.*, **65**, 365(1964).
4. Krishnan G.P.,Beimfohr S. , and Leighton D.T., *J. Fluid Mech.*, **321**, 371(1996).
5. Prieve D.C., Jhon M.S. and Koenig T.L. , *Journal of Rheology*, **29**, 639(1985).
6. Segre G., Silberberg A., *J. Fluid Mech.*, **14**, 115(1962).
7. Han M., Kim C. J. *Rhol.*, **43**(5), 1157(1999)