

고점도 현탁액의 테 흐름에서 입자 응집의 형태에 미치는 회전속도의 영향

배선혁, 김도현

한국과학기술원 화학공학과, 대전, 305-701

Effects of Rotating Speed on the Patterns of Particle Segregation in a Rimming Flow of Highly Viscous Suspension

Sun Hyuk Bae and Do Hyun Kim

Department of Chemical Engineering, KAIST, Taejon 305-701, Korea

서론

입자를 혼합한 고점도의 유체에 전단력을 걸어 줄 경우 입자는 시간이 지남에 따라 이동하여 일정한 형태를 이루며 응집하게 된다. 뉴턴성 유체를 기본으로 한 현탁액의 전단흐름에서 입자 이동에 관하여 Leighton 과 Acrivos 는 전단율과 입자 농도의 차이에 의해 입자가 이동(혹은 확산)한다는 이론을 발표하였고[1], Teflow 와 Graham 등은 내경이 다른 두 개의 실린더를 이용하여 Couette 흐름 실험을 행하여 입자의 응집을 관찰하였다[2]. 최근에는 NMR 를 이용한 비파괴적인 입자농도 및 속도 측정 기술에 힘입어 입자 농도 분포의 정량적인 분석이 연구되고 있다[3-4].

한편 수평한 실린더에 유체를 일부분 채워 축을 중심으로 회전시킬 경우 다양한 형태의 테 흐름이 관찰되어 왔다. 테 흐름의 형태는 실린더의 회전속도, 유체의 물성 그리고 유체의 충전율에 따라 그 형태가 달라진다. 이러한 테 흐름은 특성상 표면에 얇은 유체의 막을 형성하는 coating 흐름과 비슷한 현상으로 분류되나 회전속도에 따라 stationary pendent 나 hydrocyst 등이 형성되는 등 테 흐름만의 독특한 현상을 보이기도 한다[5-6]. 그 동안 테 흐름에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으나 wavy front 와 같은 축 방향의 불안정성에 대해서는 아직까지 정확한 원인이 규명되어 있지 않다.

최근에는 수평한 실린더 내에 입자를 혼합한 고점도 유체를 채워 회전시키며 입자 응집을 관찰한 연구가 수행되었다. Tirumkudulu 등은 전단율과 입자 농도에 의해 입자가 이동한다는 Acrivos 의 이론을 적용하여 수평한 실린더 내의 입자 응집을 설명하였으며[7], Boote 등은 테 흐름에 미치는 입자의 영향을 고찰하였다[8]. 입자의 응집에는 실린더의 회전속도, 유체의 물성, 유체의 충전율, 입자의 조성, 전단력, 중력 등이 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나 정확한 메커니즘은 아직까지 밝혀진 바가 없다.

본 연구에서는 수평한 실린더 내에 입자를 혼합한 고점도 유체를 채워 실린더의 회전속도에 따른 테 흐름의 형태 변화를 관찰하는 한편 입자의 조성과 물성, 그리고 회전속도가 입자 응집의 형태에 미치는 영향을 고찰하였다.

실험

본 연구에서는 길이 30cm, 내경 2.5cm 의 아크릴 재질로 된 투명한 실린더를 사용하였다. 실린더는 양 쪽 끝에 연결된 축대에 의해 수평으로 지지되며 수평축을 중심으로 일정한 속도로 회전하게 된다. 실린더의 한 쪽 끝을 속도 가변 모터와 연결하였으며 속도 범위를 0 에서 20rpm 으로 하였다. 실험장치의 개략도를 그림 1 에

나타내었다. 회전속도는 특정 횡수만큼 회전하는데 걸리는 시간을 stopwatch 로 측정하여 계산하였다. 실린더의 회전속도(ω)는 레이놀즈 수($Re=(\omega R h)/\nu$)로 표현하였으며 이때 R 은 실린더의 반지름, ν 는 유체의 kinematic viscosity 그리고 h 는 실린더 내벽에 형성된 유체 막의 평균 두께이다.

분산매로서 Triton X-100, $ZnCl_2$ 그리고 물을 혼합한 유체를 사용하였으며 유체의 점도는 240 cP (23°C), 비중은 1.172 g/cm^3 이다. 유체의 충전율(F)을 0.1~0.15 의 범위에서 변화시켜 가며 실험하였다. 입자로는 PMMA 와 $CaCO_3$ 를 사용하였으며 균일한 입자를 얻기 위해 표준체를 이용하여 일정한 크기의 입자를 분리하여 사용하였다. PMMA 와 $CaCO_3$ 의 비중은 각각 1.18 g/cm^3 , 2.71 g/cm^3 이며 평균입경은 각각 350 μm , 90 μm 이다. 입자의 조성은 5 ~ 25 wt. %의 범위에서 변화시켰다. 입자의 형태를 알아보기 위해 광학 현미경으로 관찰한 결과 PMMA 입자는 완전한 구형이나 $CaCO_3$ 입자는 모양이 불규칙하였다. 입자응집의 관찰을 용이하게 하기 위해 염료(Terasil A, CIBA Speciality Chemicals Co.)를 사용하여 PMMA 를 염색하였다. PMMA 에 2 wt. %의 염료를 섞고 부피비 30 배의 증류수와 혼합하여 1 시간 가량 가열하여 염색하였다. 기포가 포함되지 않도록 하면서 입자와 분산매를 고르게 혼합한 후 실린더에 채우고 회전속도를 변화시켜가며 입자 응집의 패턴의 변화를 관찰하였다.

결과 및 고찰

유체의 충전율 F 가 0.1 보다 작은 경우 0~20rpm 범위의 회전속도에서는 입자 응집이 일어나지 않았다. $F < 0.1$ 인 경우 유체는 실린더 내벽에 전체적으로 얇은 막을 형성하며 벽면을 따라 회전하였으나 $F > 0.1$ 인 경우 충전된 유체 전부가 벽면을 따라 회전하지 못하고 중력에 의해 실린더 아래 부분에 모이게 되고 bump 를 형성하였다(그림 2). 즉 입자가 응집하기 위해서는 bump 가 형성되어야 함을 확인하였고 이후의 실험에서 $F > 0.1$ 로 조절하였다.

PMMA 입자와 $CaCO_3$ 입자를 1:1 로 혼합하여 입자 응집을 실험한 경우와 PMMA 입자만을 사용하여 실험한 결과를 그림 3 에 나타내었다. 전자의 경우 회전속도를 증가시키면 입자 응집의 띠간 거리(두 띠의 중심간의 거리)가 현저하게 증가하였고 후자의 경우 띠간 거리는 크게 증가하지 않았다. 전자의 경우 회전속도를 변화시켜가며 입자응집의 형태를 촬영한 사진을 그림 3 의 (b)에 나타내었다. 임계 회전 속도 이하에서 유체는 실린더의 내벽에 축 방향으로 두께가 일정한 coating 흐름을 형성하며, 입자는 유체 내에 균일하게 분산된 상태로 존재한다. 그러나 임계 회전속도 이상에서 30 분 정도 지난 후 입자는 일정한 간격을 두고 띠를 이루어 조금씩 모이기 시작하며 1 시간 정도 지나면 뚜렷한 응집을 보인다. 입자가 응집된 후 회전속도를 증가시키면 띠는 축 방향으로 조금씩 움직이면서 주위의 띠와 합쳐지고, 띠간 거리가 늘어난 상태로 다시 일정한 간격을 유지한다. 회전속도가 증가할수록 입자 응집의 띠가 선명해지고 띠간 거리가 길어짐을 그림 3 의 (b)에서 확인할 수 있다. 또한 입자 응집이 충분히 일어난 후에는 띠와 띠 사이에는 입자가 남아있지 않음을 확인할 수 있었다.

그림 4 의 (a)에 입자의 농도에 따른 띠간 거리와 띠의 폭의 변화를 나타내었다. 입자의 농도를 증가시킬 경우 띠간 거리는 크게 증가하지 않으나 띠의 모양이 뚜렷해지고 띠의 폭이 증가하였다. 실린더 내의 띠의 개수에 큰 변화가 없는 상태에서 입자의 농도가 증가하여, 각각의 띠에 더 많은 입자가 존재하게 되어 띠의 모양이 뚜렷해지고 띠의 폭이 증가한 것으로 보인다(그림 5).

정지상태에서 천천히 회전속도를 올릴 경우 입자가 응집하기 시작하는 임계 회전속도를 그림 4의 (b)에 실선으로 나타내었다. 임계 회전속도는 입자의 농도에 따라 증가함을 알 수 있다. 즉 입자의 조성이 커질 경우 많은 양의 입자는 실린더의 아래 부분에 존재하게 되며 응집을 시작하기 위해서는 더 빠른 회전 속도가 필요함을 나타낸다. 그러므로 입자가 응집하기 위해서는 적정한 양 이상의 입자가 실린더의 회전력에 의해 coating 흐름을 따라 회전해야 한다는 것을 알 수 있다. 일단 입자 응집이 일어난 후 다시 회전속도를 낮추어 가며 관찰한 결과 입자의 재분산이 일어나는 임계 회전속도(점선)는 입자가 응집하기 시작하는 임계 회전속도보다 낮은 값을 보인다.

임계 회전 속도 이하에서 유체는 실린더 아래 부분에 축 방향으로 직선의 front 를 형성한다. 그러나 임계 회전 속도 이상에서 입자가 응집하여 띠를 형성할 경우 front 는 직선에서 wave 형태로 변화한다. 즉 입자가 응집된 띠 부분에서 front 가 융기하여 전체적으로 wave 의 형태를 띄게 된다. 그림 5에 나타난 바와 같이 띠의 폭이 클 경우 front 는 넓고 높게 융기하므로, wave 의 형태는 입자의 농도를 증가시킬 경우 더욱 뚜렷해짐을 확인할 수 있다.

참고문헌

1. D. Leighton and A. Acrivos, *J. Fluid Mech.*, **177**, 109 (1987).
2. N. Tetlow and A. L. Graham, *J. Rheol.*, **42**(2), 307 (1998).
3. A. W. Chow, S. W. Sinton, J. H. Iwamiya and T. S. Stephens, *Phys. Fluids*, **6**(8), 2561 (1994).
4. R. E. Hampton, A. A. Mammoli, A. L. Graham and N. Tetlow, *J. Rheol.*, **41**(3), 621 (1997).
5. F. Melo, *Phys. Rev. E*, **48**, 2704 (1993).
6. S. Thoroddsen and L. Mahadevan, *Exp. Fluids*, **23**, 1 (1997).
7. O. A. M. Boote and P. J. Thomas, *Phys. Fluids*, **11**(8), 2020 (1999).
8. M. Tirumudulu, A. Mileo and A. Acrivos, *Phys. Fluids*, **12**(6), 1615 (2000).

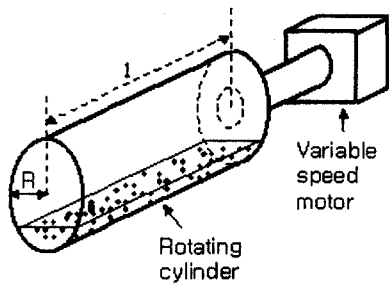


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

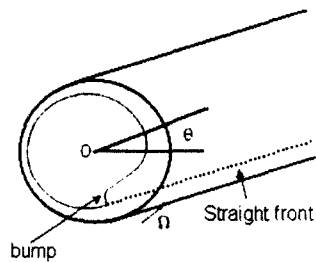


Fig. 2. Schematic of cross-sectional view of rotating cylinder.

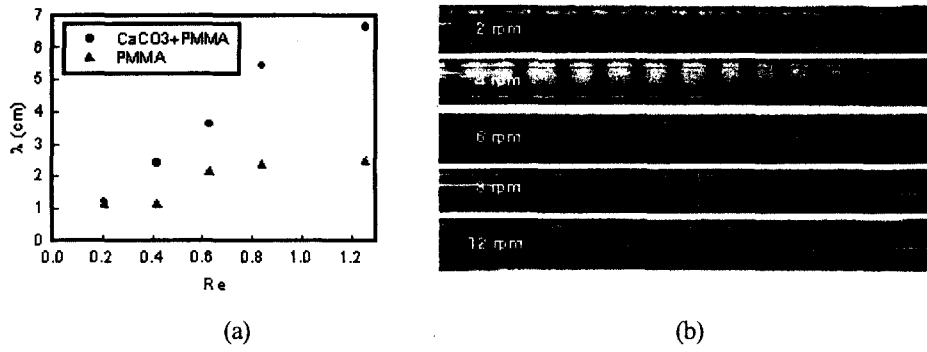


Fig. 3. (a) Effect of rotation speed on wavelength. (b) Pictures showing the increase of wavelength according to the rotation speed : 2, 4, 6, 8, 12 rpm from top to bottom. (Filling fraction = 15 vol %, particle conc.= 10 wt.%)

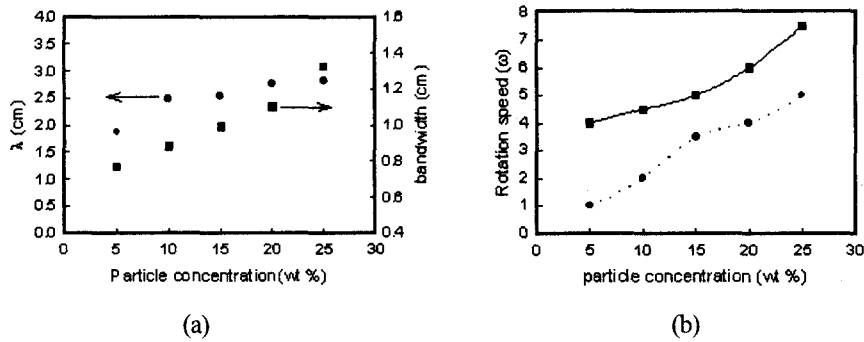


Fig. 4. Effect of particle concentration on (a) wavelength and bandwidth and (b) critical rotation speed at which particles start and stop segregating. (Filling fraction = 15 vol. % with PMMA particle)

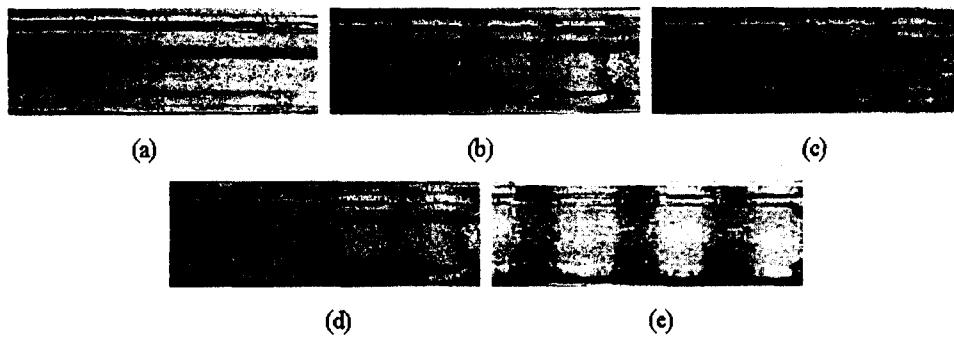


Fig. 5. Effects of particle concentration on the bandwidths. (a) 5 wt. %, (b) 10 wt. %, (c) 15 wt. %, (d) 20 wt. % and (e) 25 wt. %.