

## 구형입자가 분산된 현탁액의 관흐름에서 입자이동에 관한 연구

한민수, 김민철\*, 김종업, 이순철\*  
 충남대학교 고분자공학과, \*한국과학기술원 물리학과

## Particle migration in pipe flows of suspensions of spherical particles

M. Han, M. Kim\*, C. Kim and S.C. Lee\*  
 Chungnam Nat. Univ., Korea Adv. Inst. Sci. Tech.

## 서 론

현탁액의 유동 및 현탁액내의 입자운동에 관하여는 지금까지 이론적으로나 공업적으로 많은 연구의 대상이 되어왔다. 최근 들어 fine ceramics, 복합재료, 로켓연료 등의 물질개발 및 정밀공업분야에서 현탁액내의 입자 이동에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 Leighton과 Acrivos[1987]의 입자이동에 관한 선구적인 연구와 입자농도와 속도를 비파괴법으로 측정할 수 있는 기술의 하나인 MRI(magnetic resonance imaging)의 도입(Altobelli 등[1991], Sinton 등[1991], Abbott 등[1991])이래 현탁액내 입자배열의 미세구조, 입자간의 수력학적인 상호작용, 불균일한 농도분포 등에 관하여 점점 더 많은 연구결과가 발표되고 있다. 현재까지 입자농도가 아주 묽은 경우에 대하여는 여러 가지 기하학적 구조를 갖는 계에 대하여 이론적으로나 실험적으로 많은 연구가 되어 있다. 또한 농도가 40% 이상의 진한 현탁액의 기하학적으로 간단한 원통관내의 유동, Couette 유동, Cone/Plate유동 등에 관하여도 연구결과들이 발표되고 있다. 그러나 반진한영역(semi concentrated region)에서의 입자이동에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

원통형관 내에서는 Segre and Silberberg효과라고 알려진 바와 같이 아주 묽은 농도의 경우 입자가 중심으로부터 반경의 0.6배에 해당하는 곳에 위치하게 된다. 이러한 입자 이동은 관성에 의하여 나타나게 된다. 반면 입자의 농도가 아주 진하여지면(40% 이상) 입자가 관 중심 쪽으로 모이는 것으로 알려져 있다. 따라서 입자농도값이 이러한 사이에서는 입자의 이동이 어떻게 생기며 궁극적으로 입자농도는 반경방향으로 어떠한 분포를 갖게될 것인가 하는 문제가 자연스럽게 대두될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 농도범위의 현탁액이 원통형관을 층류로 흐를 때 입자이동에 의한 불균일한 농도분포형성에 관하여 MRI를 이용하여 연구하였다.

## 실 험

현탁액은 중력의 영향이 없도록 분산매와 입자의 겉보기 밀도를 동일하게 맞추어 제조하였다. 입자로는 LG화학(주)에서 제조한 PMMA 구형입자를 표준체로 쳐서 이중 평균직경이 550 micron인 것을 사용하였다. 분산매는 시약급의 글리세린과 에틸렌글리콜을 혼합하여 고체입자와 비중이 같도록 조성을 조절하였다. 고체입자내에 작은 기포가 포함되어 있는 것이 많아 비중이 일정하지 않았기 때문에 고체입자보다 비중이 작게 준비한 분산매에 입자를 넣어 가벼운 것을 골라낸 후 여기에 글리세린을 조금씩 넣어 비중을 시행착오로 맞추었다. 이때 10시간 정

도 경과후까지 입자가 가라 앉거나 뜨지 않으면 비중이 맞추어 진 것으로 간주하였다. 이러한 용액은 입자농도가 10% 이하이기 때문에 원하는 농도를 얻기 위하여 진공펌프와 여과장치를 이용하여 용매를 제거하고 농도를 측정하였다. 이 방법을 이용하면 초기에 입자농도가 진하지 않기 때문에 현탁액내에 기포를 유입시키지 않는 장점도 있었다. 순수한 용매만의 점도는 293K에서 105 mPa.s이었다. 입자농도는 10%와 19%의 것을 대상으로 하였다.

실험장치는 현탁액을 저장하고 가압질소로 압력을 가할 수 있는 20 liter크기의 스테인리스스틸 용기와 여기에 연결된 호경 1/4인치의 tubing을 사용하였다. MRI 장치내에는 금속을 사용할 수가 없고 압력 tap 등에 의하여 유동장에 영향을 주지 않도록 하기 위하여 4m 정도의 plastic tubing을 끈게 펴서 사용하고 압력강하는 측정하지 않았다. 현재까지 문헌에 보고된 결과들이 entrance length가 충분히 길지 않아 완전전개된 농도분포를 얻지 못하였던 것으로 지적되고 있으므로 본 연구에서는 입자농도가 충분히 발달된 상태에 있도록 가는관을 사용하고, 입구에서 2m 이상 떨어진 곳에서 농도분포를 측정하였다.

MRI 장치와 필요한 software는 직접 제작 설치한 것을 사용하였다. RF coil은 관에 6mm 길이로 감았다. 관의 단면에 약 60 x 60 pixel이 위치하도록 하였고 입자 농도를 256단계의 명도단계(gray scale)로 표시하였다.

## 결과 및 토론

P1.1 - P1.6까지 입자농도가 10%인 경우의 평균속도의 변화에 따른 입자농도 분포의 변화를 보였다. 영상에서 고체는 명도가 전혀 나타나지 않으므로 어두울수록 고체가 많은 것을 나타낸다. 밝은 원 밖의 부분은 물론 튜브밖이므로 고려할 필요가 없다. P1.1에서 정지상태에서는 입자가 관내에 고르게 분포되어 있다. 약간의 반경방향의 규칙성은 유체가 관으로 흘러나오는 과정에서 생긴 구조이며, 전체적인 불균일성은 입자 크기가 관경에 비하여 아주 작지 않기 때문인 것으로 생각된다. P1.2에서 유속이 작으면 입자들이 관의 중심부분에 입자가 모이는 것이 관찰되다가 P1.3과 같이 속도가 8.37 cm/s로 되면 입자가 튜브단면에 고루 퍼지게 된다. 속도가 13.9 cm/s가 되면 P1.4과 같이 중앙에는 입자가 적어지고 벽에서 떨어진 곳에 strip을 형성한다. P1.5, P1.6과 같이 속도가 18.3 - 22 cm/s이 되면 strip은 그대로 유지 되면서 영상이 더욱 강해진다.

P2.1-2.17에는 입자농도가 19%일 때의 속도변화에 따른 영상을 보였다. 10%의 경우에서와 같이 정지상태에서는 입자가 관내에 고르게 분포되어 있다(P2.1). 유체가 작은 속도로 흐르면(P2.2) 입자가 가운데로 모이며 이때 상은 10%때보다 훨씬 강하게 보인다. 이는 입자의 농도가 높기 때문이다. 속도가 3.97 cm/s으로 커지면 (P2.3) 가운데 입자가 모이는 영역이 더 확실하여 지고, 6.62 cm/s이 되면 (P2.4) 입자가 모인부분이 더 커지게 된다. P2.2, P2.3, P2.4에서 입자가 완전히 가운데로 몰려있는 것은 아니며, 중심에서부터 멀어져도 약간의 입자가 존재한다. 물론 벽 바로 옆에는 입자가 거의 없는 것으로 보인다. 속도가 8.76 cm/s이 되면 (P2.5) 중앙에 입자가 몰려있고 중심과 벽사이의 중간에는 입자가 적다가 다시 입자의 strip을 형성한다. 10%의 경우에서는 이때의 속도는 입자가 고루 퍼지는 속도로서 농도에 따라 약간 다른 현상을 나타냄을 볼 수 있다. 속도가 10.3 cm/s - 12.2 cm/s에서는 (P2.6, P2.7) 입자가 중앙에 몰린 부분과 strip부분으로 뚜렷하게 나뉘어 몰려 있는 것을 볼 수 있다. 속도가 16.2 cm/s 에서는 (P2.8) 원형의 strip으로부터 타원형으로 형태가 바뀌어 가며, 속도 18.2 cm/s에서는 중앙의 입자관과 strip이 12시, 6시 방향에서 합쳐지기 시작한다(P2.9). 속도가 20.4 cm/s에서는

(P2.10) P2.9의 경향이 더욱 심하여 진다. 속도가 21.1 cm/s이 되면 결국 strip과 중앙 부분이 거의 완전히 합쳐져서 입자가 모여 있는 것을 볼 수가 있다.

10%, 20%의 입자 농도를 갖는 현탁액에 대하여 본 연구에서 얻은 연구 결과는 현재까지 보고된 아주 묵거나 진한 경우와는 전혀 다른 결과임을 볼 수 있다. 특히 본 연구에서는 속도에 따라 입자 농도 분포가 다르게 나타나는 것을 볼 수 있는데 이러한 점은 아직까지 보고된 바가 없는 새로운 결과이다.

### 인용문헌

Leighton, D. and A. Acrivos, 1987, *J. Fluid Mech.* **181**, 415.

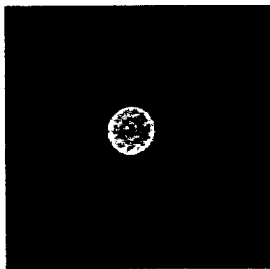
Altobelli, S.A. et al., 1991, *J. Rheol.* **35**, 721.

Sinton, S.W. et al., 1991, *J. Rheol.* **35**, 735.

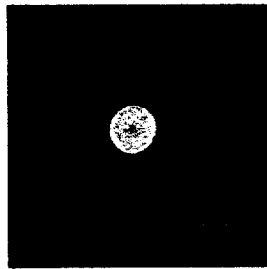
Abbot, J.R. et al., 1991, *J. Rheol.* **35**, 773.

### 감 사

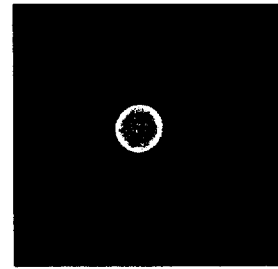
본 연구를 특정기초 연구로 지원하여주신 한국과학재단에 감사드립니다. 또한 PMMA 입자의 일부를 지원하여 주신 LG화학에 감사드립니다.



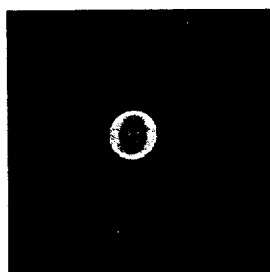
P1.1. Static state



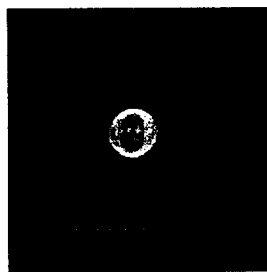
P1.2. 1.93 cm/s



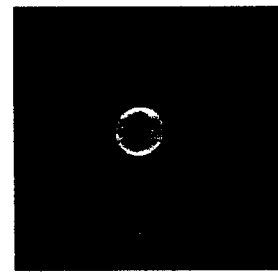
P1.3. 8.37 cm/s



P1.4. 13.9 cm/s

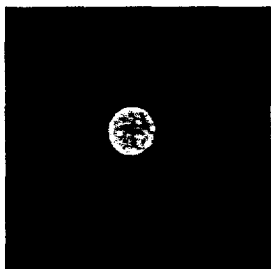


P1.5. 18.3 cm/s

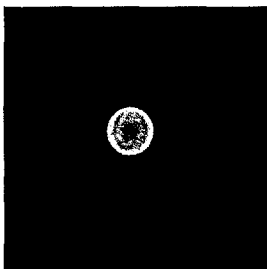


P1.6. 22.0 cm/s

Plate 1. Magnetic resonance images of particles for differing average velocities when the particle concentration is 10%



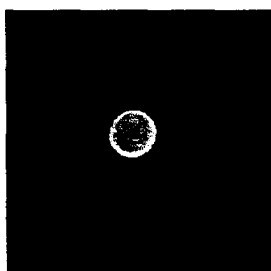
P2.1. Static state



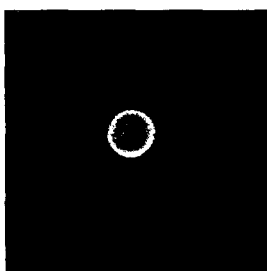
P2.2. 1.34 cm/s



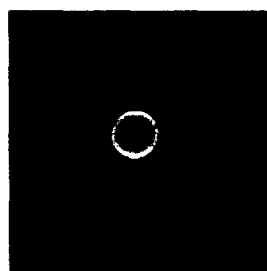
P2.3. 3.97 cm/s



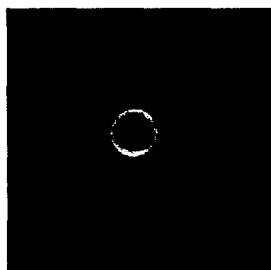
P2.4. 6.62 cm/s



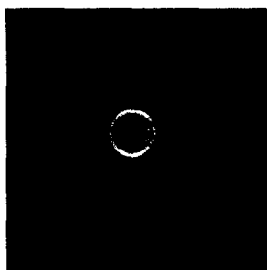
P2.5. 8.76 cm/s



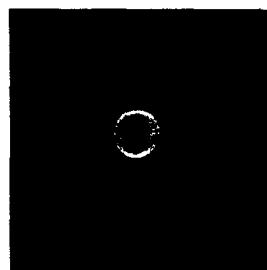
P2.6. 10.3 cm/s



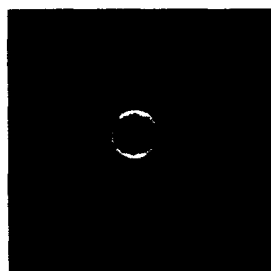
P2.7. 12.2 cm/s



P2.8. 16.2 cm/s



P2.9. 18.2 cm/s



P2.10. 20.4 cm/s



P2.11. 21.2 cm/s

Plate 2. Magnetic resonance images of particles for differing average velocities when the particle concentration is 19%