

물속에서 입자들의 안식각

김지선, 이동현*
성균관대학교 화학공학과
(dhlee@skku.edu*)

Restose Angle of Particles in water

Ji Sun Kim, Dong Hyun Lee*
Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University
(dhlee@skku.edu*)

서론

안식각 (restose angle)은 입자의 흐름특성을 나타내는 인자이다. 입자를 평평한 바닥에 부으면 점점 쌓여 더미를 이루다가 바닥과 특정 각도를 이루게 되면 입자들이 더 이상 쌓이지 않고 흐르게 되는데 이 때 입자가 가지는 최대의 각도를 restose angle이라고 한다. Restose angle이 작을수록 입자는 잘 흐른다는 것을 의미한다. Restose angle이 산업적으로 중요한 이유는 입자의 processing을 위한 장치를 디자인 할 때 유용하게 이용되기 때문이다. 예를 들어 입자를 운반하거나 저장할 때 사용되는 hopper나 silo를 설계할 때 이용되고, 컨베이어벨트의 사이즈를 결정하는데 사용된다. 또한 vessel안에서의 입자의 안정성을 계산하는데 결정적인 값이기도 하다.

따라서 그동안 restose angle에 영향을 주는 요인에 대한 많은 연구가 이루어져왔다 [1-4]. Restose angle은 입자 고유특성인 입자의 밀도, 표면적, 마찰계수에 영향을 받기도 하지만, 액체의 점도나 액체의 함유량, 압력에 따라서도 달라진다. 실제로 물의 함유량이 증가할수록 restose angle이 증가하는 특성을 보이는데, 이것은 모래성을 쌓을 때 물을 적셔서 쌓을 때 더 높이 쌓을 수 있다는 것을 알면 이 현상을 이해할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 물속에서 입자들의 거동을 살펴보고 수분 함유량에 따른 restose angle의 영향을 살펴보았다.

실험

Fig. 1과 같이 사각 아크릴 (0.15 x 0.15 x 0.3 m) 상자 안에 직경 0.05 m 인 윗면이 막

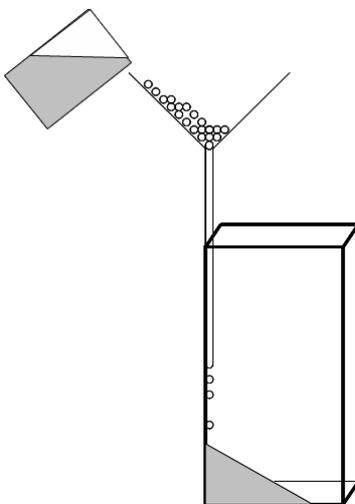


Fig. 1. 실험장치 사진

혀있는 원통형관을 설치하여 물속에서 입자들의 안식각을 측정하였다. 입자들의 안식각을 측정하기 위하여 사용된 입자들은 table 1에 소개하였다. 입자는 벽면을 따라 흐르도록 하여 입자가 충분히 쌓이게 한 후 바닥과 입자가 이루는 각도(θ)를 측정하였다. 실험에 사용된 물은 25°C이며, 대기압 하에서 실험이 진행되었다.

Table 1. 입자의 특성

입자의 종류	크기	밀도
Alumina	60-80 μm	3.965
Glass beads	212-355 μm	2.47
Polymer beads	3300 μm	1.28

결과 및 토론

Repose angle은 입자 고유의 특성이기 때문에 입자마다 특정한 repose angle값이 존재한다. Fig. 2. 와 Fig. 3.을 보면 수분 함유량에 따라 repose angle이 달라지는 것을 볼 수 있다. 이는 입자 사이에 존재하는 liquid bridge의 영향 때문이다. Liquid bridge는 공기 중의 수분이 입자 표면에 흡착하거나 또는 응축하여 생긴 liquid phase로 인해 입자 사이에 생

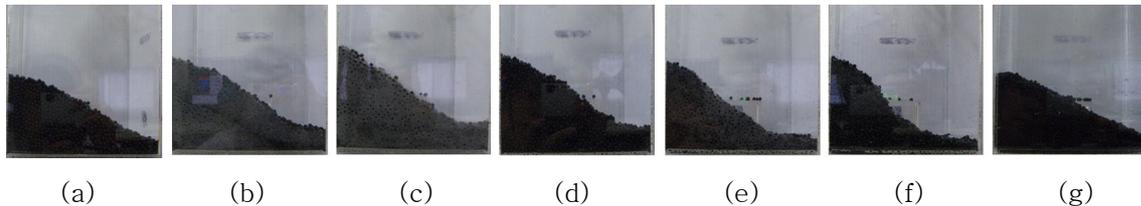


Fig. 2. 부피변화에 따른 polymer beads의 repose angle 변화 (a) $V_f=0$ (b) $V_f=0.005$ (c) $V_f=0.015$ (d) $V_f=0.03$ (e) $V_f=0.06$ (f) $V_f=0.12$ (g) $V_f=1$.

기게 되는데 그로 인해 입자 사이엔 capillary force가 생기게 된다. 이 힘은 입자의 크기, 모양, 표면장력에 따라 영향을 받아 입자의 행동이나 특성에 영향을 미치는 아주 중요한

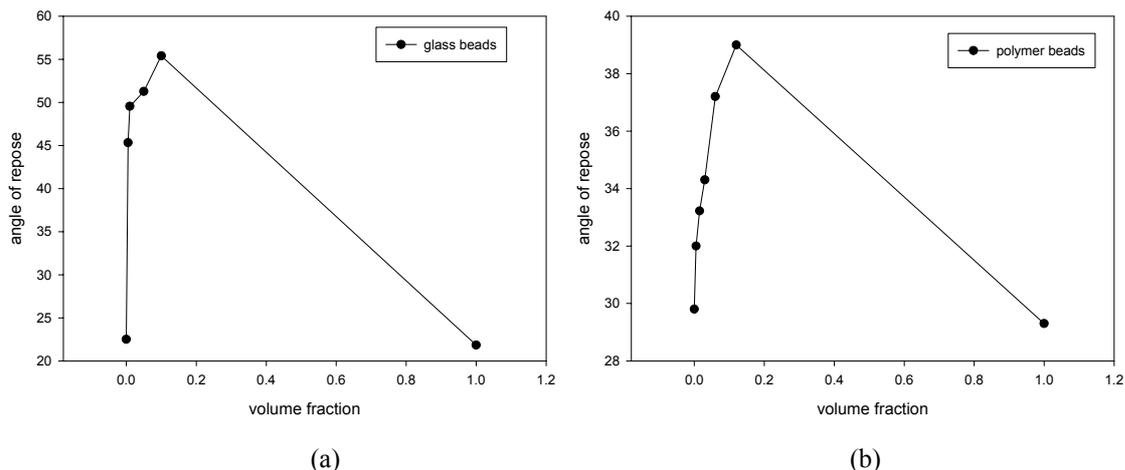


Fig. 3. 수분함유량에 따른 repose angle (a) glass beads (b) polymer beads.

힘이다. 따라서 물 함유량을 증가시키면 따라 liquid bridge의 volume이 커지게 되고 그로 인해 생긴 capillary force의 증가가 입자의 거동에 영향을 주기 때문에 repose angle의 변화가 있는 것이다.

입자와 입자 사이에 존재하는 liquid bridge에 의한 capillary force는 다음과 같은 식들(1) - (3)에 의해 구할 수 있다.

$$F_c = \pi R \sigma \sin \alpha \left[2 \sin(\alpha + \theta) + R \sin \alpha \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) \right] \quad (1)$$

$$r = \frac{2R(1 - \cos \alpha) + h}{2 \cos(\alpha + \theta)} \quad (2)$$

$$l = R \sin \alpha - r[1 - \sin(\alpha + \theta)] \quad (3)$$

여기서 R 은 입자의 크기, σ 는 액체의 표면장력, θ 는 접촉각, α 는 liquid bridge의 half-filling angle, r 과 l 은 liquid bridge의 curvature radii, h 는 입자사이의 거리이다. 또한 입자 입자 사이에 존재하는 liquid bridge의 부피는 다음과 같은 식(4)와 식(5)에 의해 구할 수 있다.

$$V = Cr \left[\sin 2(\alpha + \theta) + \arcsin \{ 2 \cos(\alpha + \theta) \} \right] \quad (4)$$

$$C = R \sin \alpha \frac{2R \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \frac{h}{2}}{\cos(\alpha + \theta)} \quad (5)$$

위와 같은 식에 의해 입자 사이에 존재하는 물의 부피와 capillary force의 관계를 살펴보면 Fig. 4와 같다.

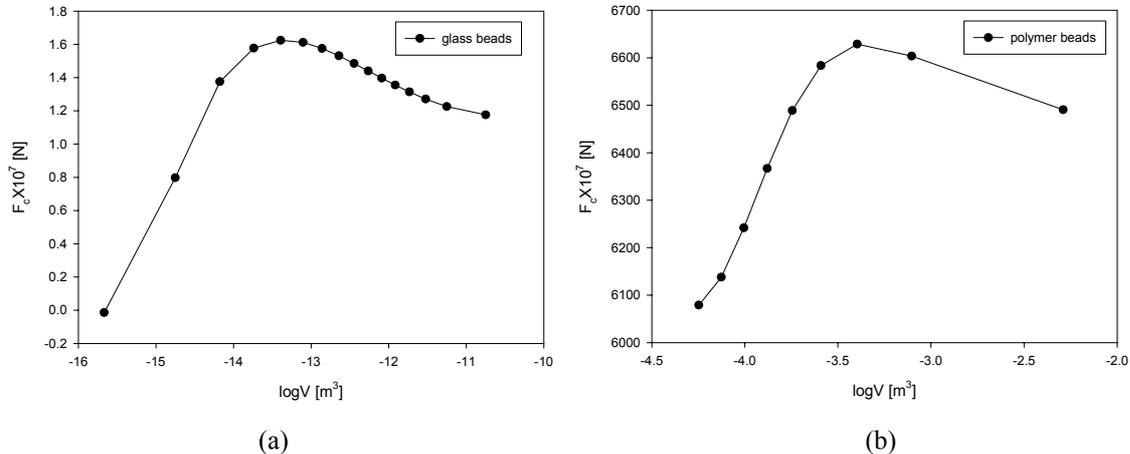


Fig. 4. 물의 양과 capillary force와의 관계 (a) glass beads (b) polymer beads

Fig. 4.에서 볼 수 있는 것과 같이 부피가 커짐에 따라 capillary force는 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 계산 값은 최대값을 갖다가 감소하는 현상을 보이는 반면 실험에서는 그런 현상을 볼 수 없었다. 계산값은 입자와 입자 사이에 liquid bridge가 한개 존재할 경우의 값이고 실제로는 입자의 배열에 따라 liquid bridge가 여러개 존재하기 때문에 다를 수 있다. 또한 물의 양이 많아짐에 따라 liquid bridge가 커지게 되고 결국 입자가 liquid bridge안에 갇히게 되어 물속에 있는 것과 같은 상황에 놓이게 된다. Table 2를 보면 물속에서의 repose angle은 공기 중에서의 값과 동일한 것을 볼 수 있다. 이는 입자가 물속에 완전히 잠겼을 때에는 외부 요인에 의한 것이 아니라 입자의 특성에만 영향을 받아 본래의 흐름 특성으로 돌아간다는 것을 의미한다. 물속에서는 repose angle이 증가하

지 않는 이유는 물 함유량에 따른 repose angle이 변한 원인과 관련이 있다. Liquid bridge는 고체, 액체, 기체로 이루어진 상황에서 존재하는 cohesion이다. 그러나 물속에서는 liquid bridge를 만들기 위해 필요한 기체가 존재하지 않기 때문에 capillary force의 영향을 받는 것이 아니라 입자의 본래 특성인 밀도, 표면적, 마찰계수에 의해서만 repose angle이 결정되는 것이다. 때문에 공기 중에서의 repose angle은 물속에서의 값과 차이가 없는 것으로 판단된다.

Table 2. 공기 중과 물속에서의 입자의 repose angle과 표준편차

입자의 종류	Air [°]	표준편차	Water [°]	표준편차
Alumina	36	1.9	36.5	1.1
Glass beads	23	0.79	21	1.2
Polymer beads	30	0.97	29	1.2

참고문헌

1. A. Samadani and A.Kudrolli, Angle of repose and segregation in cohesive granular matter, Phys. Rev. E. 64 (5) : Art. No. 051301 (2001).
2. Anthony Chi-Ying Wong, Use of angle of repose and bulk densified for powder characterization and the prediction of minimum fluidization and minimum bubbling velocities, Chemical Engineering Science 57 (2002).
3. Chik Z, Vallejo L, Characterization of the angle of repose of binary granular materials, Canadian Geotechnical Journal 42 (2) (2005).
4. Pohlman NA, Severson BL, Ottino JM, Lueptow RM, Surface roughness effects in granular matter: Influence on angle of repose and the absence of segregation, Phys. Rev E. 73 (3) (2006).
5. Yu. G. Tselishchev and V. A. Val'tsifer, Influence of the type of Contact between articles joined by a liquid bridge on the capillary cohesive forces, Colloid journal. 65 (3), 614600 (2002).
6. O. Pitois, P. Moucheront and X. Chateau. J, Liquid bridge between two moving spheres, Colloid interface Sci. 231. 26 (2000).
7. F. Soulié, F. Cherblanc, M.S. El Youssoufi and C. Saix, Influence of liquid bridges on the mechanical behaviour of polydisperse granular materials, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 30 : 213-228 (2006).
8. A. Samadani, A. Pradhan and A. Kudroii, Size segregation of granular matter in silo discharges, Phys. Rev. E. 60, 7203 (1999).