

공기부유입자의 기초이론 (Ⅲ. 입자의 점착)

— 목 차 —

- 1. 점 착 력
- 2. 입자의 분리
- 3. 입자의 튕김 (Bounce)

생 산 기 술 연 구 원
(연 구 개 발 본 부)
교 수 오 명 도

에어로졸 입자는 부딪히는 어떤 표면이라도 잘 부착된다. 이러한 현상이 바로 에어로졸 입자를 일반 기체와 구별짓는 특징이다. 입자여과 및 그외다른 입자포집방법은 주로 표면에 부착되는 입자의 점착력에 의존한다.

1 μm 정도의 입자에 있어서 점착력은 어떤 다른 형태의 힘에 비해서 매우 크다. 입자의 점착은 그것이 가지는 중요성에도 불구하고 거의 이해되지 않고 있으며 점착 현상에 대한 서술조차 정상적인 것에 불과한 실정이다.

입자의 점착은 매우 복잡한 현상이므로 점착에 영향을 미치는 모든 인자를 포함하는 완전한 이론은 아직 존재하지 않는다.

많은 실험이 입자의 점착에 대해 실행되어 왔으나, 그것은 주로 진공상태와 같은 특정한 상태에서 이루어져 실제와는 많은 차이가 존재한다.

먼저, 1절에서 점착력의 특성과 이러한 점착력에 영향을 끼치는 변수들에 대해서 알아보자.

1. 점착력

점착력의 대부분은 van der Waals 힘 정전기력, 그리고 액체막의 표면장력 등이다. 이러한 힘들은 주로 재질, 모양, 입자의 크기, 거칠기, 표면의 오염도, 상대습도, 온도, 접촉 시간, 처음 접촉속도 등에 영향을 받는다.

먼저 점착력의 이론적 해석을 생각해 본다.

가장 중요한 힘은 London-van der Waals 힘으로써, 이 힘은 주로 분자사이에

서 작용하는 인력이다.

van der Waals 힘은 어떤 물질내에 존재하는 전자의 불규칙한 운동이 순간적으로 쌍극자(dipole)라 불리는 전하농도 지역을

발생시킴에 의해 생긴다. 이러한 쌍극자는 주위 물질에 2차 쌍극자를 유도시켜 서로 끌어당기는 힘을 발생시킨다 [그림 1].

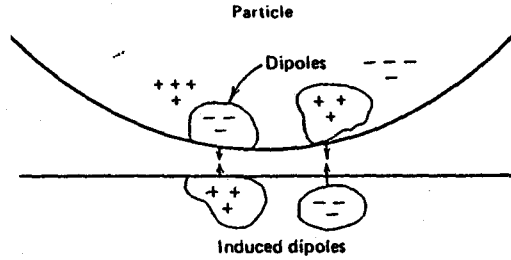


그림 1. Van der Waals 점착력

Van der Waals 힘은 두 표면 사이의 거리가 멀어지면 급속하게 감소되며, 따라서 표면으로부터 몇개의 분자에 해당되는 거리내만

영향을 미친다. 미세한 관점에서 보면 대부분의 표면은 불규칙하여 적어도 초기에는 입자들이 몇개의 지점에서만 접촉하게 된다.

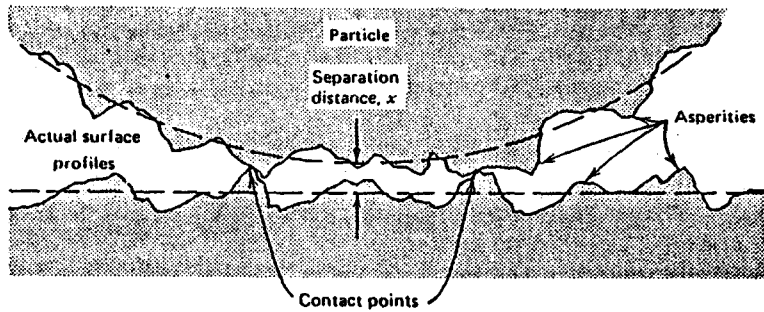


그림 2. 미세한 관점으로 본 표면 접촉 모양

그림 2에서 보는 것처럼 대부분의 물질은 표면 거칠기에 의존하는 평균거리 x 만큼 떨어져 있게된다. 매끄러운 표면인 경우 이러한 거리는 대개 $0.0004 \mu\text{m}$ 이다. van der Wa-

als 힘의 전체크기는 평평한 표면근처의 구 모양 입자의 모든 분자쌍 사이에 작용하는 힘을 적분하여 얻는다.

따라서 주어진 물질의 표면과 입자사이에 작

용하는 점착력은 다음과 같다.

$$F_{adh} \propto \frac{d}{x^2} \quad (1)$$

처음 입자가 표면에 접촉한 후에 van der Waals 힘과 정전기력은 서서히 접촉표면을 변형시키는데, 이것은 물체 표면과 입자사이의 인력과 변형에 저항하는 힘이 평형을 이룰 때까지 발생한다.

이러한 변형과정으로 인해 접촉표면은 넓어지게 되는데 이때 변형과정은 몇시간에 걸쳐서 발생할 수도 있다.

물체의 경도 (hardness) 는 마지막 접촉

면적의 크기 및 점착력의 강도를 결정하는 인자이다.

점착력은 부드러운 플라스틱에서 석영에 이르기까지 대개 세분류의 크기로 구별된다.

0.1 μm 이상의 입자들은 어떤 순수전하 Q를 가지고 있는데, 이러한 전하는 반대극성의 전하가 존재하게 되면 인력으로 작용하게 된다.

$$F_2 \propto \frac{q^2}{x_q^2} \quad (2)$$

여기서 x_q 는 반대전하와 떨어진 거리이다.

낮은 습도에서 입자는 전하를 갖고 있으며

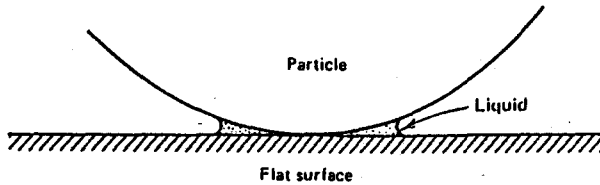


그림 3. 액체막 현상으로 인한 점착력

정전기력에 의해 표면에 부착되어 있다. 0.1 μm 이상의 입자에 의해 전달되어지는 평형전하는 약 $d^{\frac{1}{2}}$ 에 비례한다. 따라서 정전기력은 대개 지름의 1승에 비례하게 된다. 일반적으로 대부분의 물질은 그들의 표면에 액체분자를 가지고 있는데 접촉표면에서 모세관 현상으로 인한 표면장력 때문에 입자와 표면사이에 점착력이 발생한다 [그림 3].

상대습도가 90% 이상인 상태에서, 이러한 힘은 다음과 같다.

$$F_s = 2\pi\gamma d \quad (3)$$

여기서 γ 는 액체의 표면장력이다.

지금까지 다룬 이론적인 점착력은 매끄러운 표면인 경우이며, 표면의 거칠기를 고려하면

이러한 이론은 더이상 유효하지 않다. 따라서 실제표면인 경우는 주로 입자점착에 대한 실험에 의존할 수 밖에 없다. 위에서 토의한 3 가지 점착력은 모두 입자지름에 비례하며 실험식 역시 입자 지름에 비례한다.

점착력의 실험은 표면으로부터 입자를 분리시키는데 요구되어 지는 힘을 측정한다. 이것은 fiber microbalance 혹은 원심력을 사용하여 직접 측정이 가능하며, 또한 입자를 제거하기 위해 진동이나 기류를 사용하여 간접측정이 가능하다. 표면이 굳고 깨끗한 표면인 경우에 점착력에 대한 유용한 표현은 다

음과 같다.

$$F_{adh} \cong 150d[0.5+0.0045(\%RH)] \quad (4)$$

이러한 식은 25°C에서 직접측정에 의한 것이다. 여기서, 힘의 단위는 dyne이며 입자지름은 cm 이고 %RH는 %단위의 상대습도를 의미한다.

2. 입자의 분리

표면으로부터 입자를 분리하는데 요구되어 지는 힘은 입자를 표면에 수직한 원심력을 받

표 1. 단위밀도의 구입자에 대한 점착력, 중력, 기류력의 크기 비교

Diameter (μm)	Force(dyn)		
	Adhesion	Gravity	Air Current(at 1000 cm/s)
0.1	10^{-3}	5×10^{-13}	2×10^{-5}
1.0	10^{-2}	5×10^{-10}	2×10^{-4}
10	10^{-1}	5×10^{-7}	3×10^{-3}
100	1	5×10^{-4}	6×10^{-2}

게하여 입자를 분리시키는데 요구되어지는 회전속도를 결정하여 측정할 수 있다.

이러한 실험은 표면에 산재해 있는 입자를 50% 제거하는데 요구되어지는 힘은 98% 제거하는데 필요한 힘의 분포를 알려준다. 입자를 50% 제거하는데 요구되어지는 힘은 98% 제거하는 힘의 약 $\frac{1}{10}$ 정도이다.

입자를 분리시키는데 기류를 사용하는 경우

에도 비슷한 접근방식이 사용되어 질수있다.

이러한 실험에서 입자제거시 요구되는 힘을 계산하는 것은 더욱 힘들다. 이는 입자를 제거하는데 필요한 힘이 기류의 모양과 경계층 속도 분포에 의존하기 때문이다.

일반적으로 점착력은 d 에 비례하고, 반면에 입자제거시 요구되어지는 힘은 진동이나 원심력을 사용할 경우 d^3 , 기류를 이용할 경우 d^2

에 비례한다. 이것은 입자의 크기가 감소함에 따라 입자를 표면으로부터 제거하기가 더욱 더 힘들어 진다는 것을 의미한다. 즉 모래와 같은 큰 입자는 단순히 흔들거나 기류를 불어 쉽게 떨어 낼 수 있으나 매연입자와 같은 작은 입자는 쉽게 제거할 수 없다.

10 μm 보다 작은 입자는 입자가 받는 어떤 힘보다도 점착력이 가장 크다는 것을 다시 한번 강조하는 것은 중요하다 [표 1].

10 μm 이하의 작은 입자는 쉽게 제거되지 않으나, 그러한 입자의 두꺼운 층은 0.1 ~ 10mm 정도의 큰 덩어리으로써 표면을 흔들거나 기류로 불어내어 간단히 제거할 수 있다.

3. 입자의 튕김 (Bounce)

고체입자가 낮은 속도로 표면에 접촉할때 입자는 표면과 그 자신이 변형됨으로 인해 운동에너지를 잃는다. 속도가 크면 클수록 변형은 점점 커지며, 따라서 점착도 더 잘되게 된다.

입자가 높은 속도를 가지는 경우에 운동에너지의 일부는 변형과정중에 소실되며, 또 다른부분은 탄성적으로 되튀김 운동에너지로 변화된다.

만약 되튀김 에너지가 점착에너지를 초과하게 되면, 입자는 표면으로부터 튕겨나게 된다. 그러나 액체나 쉽게 변형이 가능한 물체인 경우에 되튀김의 문제는 중요하지 않다.

입자의 되튀김 문제는 주로 충돌기(impactor)나 필터에서 고체입자를 포집하는 경우

에 많이 요구되어져 왔다.

물질이 딱딱할수록, 입자가 클수록, 또 속도가 클수록 이러한 되튀김현상은 더 발생하기 쉽다. 물체 표면을 기름이나 그리스로 막을 입히는 경우 되튀김의 문제는 크게 감소된다.

보통 튕김이 발생할 수 있는 조건을 정의하는데는 2가지 접근방식이 있다. 하나는 한계 점착 혹은 운동에너지를 정의하는 것이고 또 다른 하나는 튕김이 발생하는 임계 속도 V_c 를 정의하는 것이다.

임계속도는 V_c 는 다음과 같이 정의되어진다.

$$V_c = \frac{\beta}{d_p} \quad (5)$$

여기서, β 는 물질과 모양에 의존하는 상수이다.

예를들어, $\beta = 0.02 \text{ cm}^2/\text{s}$ 는 막을 입히지 않은 금속 충돌판에 튕김이 발생하지 않는 최고 한계속도를 정의한다. [1].

입자가 표면에 충돌할때 튕김이 발생하는데 요구되어지는 운동에너지 KE_b 는 Dahneke (1971)에 의하면 다음과 같다 [3].

$$KE_b = \frac{d_p A (1 - e^2)}{2xe^2} \quad (6)$$

여기서, x 는 분리거리, A 는 Hamaker 상수라 불리는 비례 상수이고 e 는 반발계수이다. A 와 e 는 단지 입자와 표면의 재질에만 관계되는 양이다. 사실 이러한 양들은 실험으

로 결정되어져야 한다.

Esmen et al. [5] 과 Ellenbecker et al. [4] 은 2 ~ 15 μm 정도의 재 (ash) 와 uranine 염색 입자를 사용하여 튕김이 발생하지 않는 최대 KE_b 는 2×10^{-9} erg이며 튕김이 발생할 가능성이 50 % 일때 KE_b 의 값은 2×10^{-8} 에서 1×10^{-6} erg 임을 알아냈다.

지름이 10 μm 인 단위 밀도 입자에 대해 대응되는 속도는 0 일때 3 Cm/s 이고 튕겨나갈 가능성이 50 % 일때가 9 ~ 60 Cm/s 이다.

=참 고 문 헌=

1. Cheng, Y. S., and Yeh, H. C., "Particle Bounce in Cascade Impactors", *Env. Sci. Tech.*, 13, 1392-1396(1979).
2. Corn, M., in *Aerosol Science*, C. N. Davies (Ed.), Academic Press, New York, 1966
3. Dahneke, B., "The Capture of Aerosol Particles by Surfaces" *J. Colloid Interface Sci.*, 37, 342-353(1971).
4. Ellenbecker, M. J., Leith, D., and Price, J. M., "Impaction and Particle Bounce at High Stokes Numbers" *J. A. P. C. A.*, 30, 1224-1227(1980).
5. Esmen, N. A., Zicgler, P., and Whitfield, R., "The Adhesion of Particles upon Impaction," *J. Aerol Sci.*, 9, 547-556(1978).
6. Krupp, H., "Particle Adhesion, Theory and Experiment," *Advan. Colloid Interface Sci.*, 1, 113-239(1967).
7. Zimon, A. D., *Adhesion of Dust and Powder*, 2nd ed., Plenum, New York, 1980.