

극저온 CO₂ 세정에서의 드라이아이스와 오염물 입자 간 충돌에 관한 동적 해석 연구

A dynamic analysis on the collision between dry-ice and contaminant particles in the cryogenic CO₂ cleaning process

*김필기¹, #석종원²

*P. Kim¹, #J. Seok (seokj@cau.ac.kr)²

¹ 중앙대학교 기계공학부 대학원, ² 중앙대학교 기계공학부

Key words : Adhesion, Cryogenic CO₂ cleaning, Oblique collision, Dry-ice, Rough surface

1. 서론

반도체 관련 부품 및 디바이스의 고집적, 고성능화에 따라, 반도체 공정에서 발생할 수 있는 micron 혹은 sub-micron 크기의 미세 오염물이 디바이스의 수율 그리고 성능, 신뢰성에 치명적인 영향을 미치고 있다. [1, 2] 따라서, 생산 공정 중에 미세 오염물을 적절히 제거할 수 있는 세정 공정의 도입이 매우 중요하다고 할 수 있다.

실시간 세정이 가능하고 잔유물을 거의 남기지 않는 건식 세정은 질소, 아르곤, 이산화탄소 등 다양한 불활성 기체를 분사함으로써 오염물을 제거하는 세정 방법이다. 특히, 극저온 CO₂ 세정법은 유동경계층 내에 위치한 미세입자를 효율적으로 제거할 수 있는 방법으로 잘 알려져 있으며, 이를 세정 공정으로 적용하기 위하여 다양한 이론적/실험적 연구가 수행되어 왔다. [3, 4, 5] 하지만, 극저온 CO₂ 세정에 관한 연구는 대부분 실험적 접근 방법에 치중되어 있으며, 이론적 연구는 극저온 CO₂ 세정의 난해한 세정 과정에 비해 지극히 단순화된 모델을 기반으로 한 초보적인 수준에 머물러 있는 실정이다. [3, 4]

본 연구에서는 극저온 CO₂ 세정의 주된 세정 메커니즘 중 하나인 운동량 전달에 의한 세정 효과를 고찰하기 위하여, CO₂ 입자와 파티클 오염물 간 충돌에 관한 수학적 모델링을 수행하였다. 이러한 모델링 과정에서 거친 표면 위에 존재하는 오염물의 접촉 그리고 응착, 변형을 고려하기 위하여 Lennard-Jones potential theory 가 적용되었다. 이를 바탕으로 오염물의 리바운드 및 슬라이딩 운동에 대한 동적 모사가 수행되었으며, 파티클 오염물의 잔존 및 탈착 거동이 평가되었다.

2. 파티클 오염물의 접촉 및 응착 모델

그림 1 은 거친 기저부 표면과 파티클 오염물의 개념도를 나타낸 것이다. 파티클 오염물은 구형 탄성체로 가정하였고, 그림에서와 같이 거친 표면은 수많은 돌기 (asperity) 를 가지고 있으며, 돌기 머리 (asperity cap)의 반경 R 은 일정하다. 또한, 돌기 머리의 반경이 파티클 오염물의 반경에 비해 매우 작다고 가정함으로써, 돌기 머리가 평탄한 오염물 표면과 접촉하고 있는 것으로 취급할 수 있다.

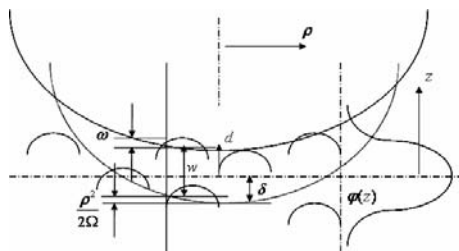


Fig. 1 A schematic for a particle on a rough surface

표면 돌기의 높이 분포는 평균면에 대한 가우스 분포로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left(\frac{z}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

식 (1)에서 σ 는 돌기 높이의 편차이며, z 는 평균면 상에 원점을 갖는 수직 좌표를 의미한다. 또한, 돌기 높이의 평균면과 변형되지 않은 파티클 오염물 표면 사이의 거리는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$d(\rho) = -\delta + \frac{\rho^2}{2\Omega} + w(\rho) \quad (2)$$

여기에서, δ 는 파티클 오염물 표면이 평균면 아래로 간섭한 깊이를 의미하고, ρ 는 파티클 중심을 원점으로 하는 수평 좌표를 나타낸다. 그리고 w 는 파티클의 수직 방향 변형을 의미한다.

앞서 기술한 가정과 식 (1)과 (2)를 도입함으로써, 기저부 표면과 파티클 오염물 사이의 반발력인 접촉 압력은 무차원화된 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다. [6]

$$f_c^*(d^*) = \beta E \left[\frac{4}{3} \sqrt{\frac{\sigma}{R}} \int_{d^*}^{d^* + \omega_c^*} \omega^{3/2} \varphi^*(z^*) dz^* + \frac{\pi \kappa H}{E} \int_{d^*}^{\infty} \{2\omega^* - \omega_c^*\} \varphi^*(z^*) dz^* \right] \quad (3)$$

식 (3)에서 $\beta = \eta \sigma R$, $\omega = z - d$ 이며, ω_c 는 임계간섭을 나타낸다. 그리고 η, E, H, κ 는 각각 돌기 면적 밀도, 유효 영률, 경도, 최대 접촉압력 인자이며, 윗첨자 *는 무차원 변수를 의미한다. 반면, 표면과 파티클 사이의 점착압력은 다음과 같다.

$$f_s^*(d^*) = \frac{8\pi\eta R \Delta\gamma z_0^{*2}}{3} \times \left[\int_{-\infty}^{d^*} \left\{ \frac{1}{(z_0^* - \omega^*)^2} - \frac{0.25z_0^{*6}}{(z_0^* - \omega^*)^8} \right\} \varphi^*(z^*) dz^* + 2 \int_{d^*}^{\infty} \left(\frac{1}{Z^{*3}} - \frac{z_0^{*6}}{Z^{*9}} \right) \varphi^*(z^*) ds^* dz^* \right] \quad (4)$$

$$Z^*(s^*, \omega^*) = z_0^* + \frac{1}{\pi} \left[s^* \sqrt{\omega^*} + (s^{*2} - \omega^{*2}) \tan^{-1} \left(\frac{s^*}{\sqrt{\omega^*}} \right) \right] \quad (5)$$

식 (5)의 z_0 와 $\Delta\gamma$ 는 각각 평형 거리, 표면 에너지이다. 파티클 오염물에 작용하는 총 압력은 앞서 정리된 식 (3)과 (4)로부터 다음과 같이 구하여질 수 있다.

$$p^*(d^*) = f_c^*(d^*) - f_s^*(d^*) \quad (6)$$

만약 접촉 영역 주변에서 파티클 거동이 선대칭의 semi-infinite half space [7] 하에 있다고 가정하면, 파티클의 변형은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (7)에서 $K(k)$ 는 k modulus의 제 1종 타원 적분이다. [8]

$$w^*(r) = \frac{4}{\pi E} \sqrt{\frac{\Omega}{\sigma}} \int_0^{\infty} \frac{\hat{r} p^*(\hat{r})}{r + \hat{r}} K \left(\frac{2\sqrt{r\hat{r}}}{r + \hat{r}} \right) d\hat{r} \quad (7)$$

또한, 표면에 작용하는 힘은 식 (6)으로부터 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$P = 2\pi\sigma\Omega \int_0^{r_c} p^*(d^*(r)) r dr \quad (8)$$

3. 드라이아이스 충돌 모델 및 동적 모사

극저온 CO₂ 세정 과정에서 드라이아이스의 충돌로 인

해 유발되는 파티클 오염물의 동적 거동을 고찰하기 위하여 동역학적 모델링 및 동적 시뮬레이션이 수행되었다. 그림 2 는 드라이아이스와 파티클 오염물의 충돌을 기하학적 변수와 함께 나타낸 것이다.

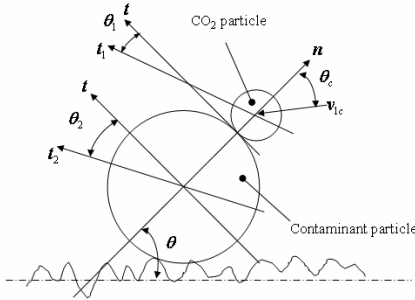


Fig. 2 Schematic diagram for the particles' collision mechanism

파티클 오염물이 식 (6)과 같은 표면력 하에 있을 때, 리바운딩 및 슬라이딩에 관한 파티클의 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_2 \ddot{\delta} = -P, \quad m_2 \ddot{x} = -\mu P_{\Gamma+} \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (9)$$

m_2 는 파티클 오염물의 질량이며, μ 는 마찰계수이다. $P_{\Gamma+}$ 는 압축 영역에 작용하는 총 힘을 의미한다.

앞서 유도된 파티클 오염물의 점착 및 점착 모델과 식 (9)의 운동 방정식을 바탕으로, 드라이아이스의 입사각, 입사 속도에 따른 파티클 오염물의 동적 시뮬레이션이 수행되었으며, 시뮬레이션에 사용된 변수는 표 1 에 정리되어 있다.

Table 1 Parameter values used in the simulation

Symbol	η	R	$\Delta\gamma$	z_0	E
Unit	Ea/m ²	m	J/m ²	m	Pa
Value	4.72×10 ¹²	3.0×10 ⁻⁷	2.5	4×10 ⁻¹⁰	197×10 ⁹
Symbol	σ	κ	H	ψ	Ω
Unit	m	-	Pa	-	m
Value	25.3×10 ⁻⁹	0.573	7.1×10 ⁹	0.5	10×10 ⁻⁶

4. 시뮬레이션 결과

그림 3 과 4 는 드라이아이스의 초기 속도와 입사각에 대한 파티클 오염물의 점착 및 탈착 거동을 나타내고 있다. 시뮬레이션 과정에서 θ, μ, e, m_1 는 각각 45°, 0.5, 0.9, 1.76×10⁻¹¹ 으로 고정되었다. 그림 3 에서 확인할 수 있듯이, 드라이아이스의 속도가 상대적으로 작을 때, 파티클 오염물에 전달되는 운동량은 오염물의 점착력을 극복할 정도로 크지 않은 것으로 나타났다. 또한, 이러한 경향은 입사각이 상대적으로 큰 경우에도 유사하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 드라이아이스가 비스듬히 입사한 경우, 그림 4 에서 확인할 수 있듯이, 파티클 오염물은 수평방향으로 이동하며, 오염물이 관심 영역 밖으로 이탈하는 경우가 발생할 수도 있다. 하지만 이러한 경우에도 오염물은 여전히 기저부 표면에 잔존한다.

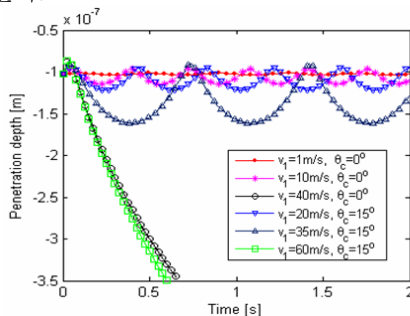


Fig. 3 Plots of penetration depth vs. time

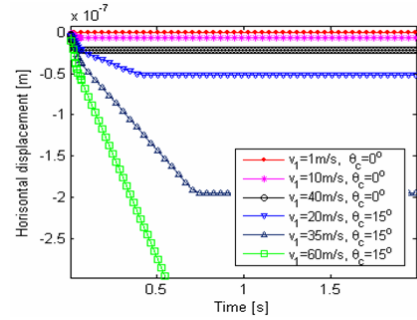


Fig. 4 Plots of horizontal displacement vs. time

반면, 드라이아이스의 입사 속도가 충분히 클 때, 그림 3 과 4 에서 확인할 수 있듯이, 파티클 오염물은 수평 방향으로 더 멀리 이동하게 될 뿐만 아니라, 기저부 표면에서 수직 방향으로 이탈하게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 드라이아이스의 운동량 전달에 관한 극저온 CO₂ 세정의 세정 메커니즘을 고찰하기 위하여, 파티클 오염물의 점착 및 점착과 드라이아이스의 충돌에 관한 모델링 및 동적 시뮬레이션을 수행하였다.

드라이아이스의 입사속도와 입사각에 대한 파티클 오염물의 동적 거동을 살펴본 결과, 오염물의 제거를 위해서는 입체치 이상의 운동량이 오염물에 전달되어야 하며, 수직 입사한 경우는 비스듬히 입사한 경우보다 더 큰 입체치를 갖는 것으로 확인되었다. 또한, 리바운딩 및 슬라이딩에 의한 오염물의 수직방향 탈착과 수평방향 이탈 거동은 입사속도와 입사각에 매우 의존적이므로, 효과적인 오염물 세정을 위해서는 오염물의 점착특성에 따른 입사조건 최적화 과정이 수반되어야 할 것으로 사료된다.

후기

본 논문은 지식경제부에서 시행한 청정기술기반 산업원천 기술개발사업의 지원으로 수행되었음(과제번호: 10024121-2009-22).

참고문헌

- Hattori, T., "Contamination control: Problems and prospects", Solid State Technol., **33**, 1-8, 1990.
- Hattori, T. and Koyate, S., "An automated particle detection and identification system in VLSI wafer processing", Solid State Technol., **34**, 1-6, 1991.
- Linger, D.R., "CO₂ (dry-ice) particle blasting as a mainstream cleaning alternative", Particles on Surfaces 5&6: Detection, Adhesion and Removal, 203-220, 1999.
- Banerjee, C.C., Lin, S., Su, H.F., Brandt, W. and Tang, K., "Cryogenic aerosol cleaning of photomasks", Proc. SPIE, **5853**, 90-99, 2005
- Kohli, R., "Precision cleaning and processing in industrial applications", Particles and Surfaces 5&6: Detection, Adhesion and Removal, 117-134, 1999.
- Konstandopoulos, A.G., "Particle sticking/rebound criteria at oblique impact", Aerosol Science, **37**, 292-305, 2006.
- Zhang, X. and Vu-Quoc, L., "Modeling the dependence of the coefficient of restitution on the impact velocity in elasto-plastic collisions", International journal of Impact Engineering, **27**, 317-341, 2002.
- Chang, W.R., Etsion, I., and Bogoy, D.B., "Static friction coefficient model for metallic rough surfaces", Journal of Tribology, **110**, 57-63, 1988.