

## 극저온 CO<sub>2</sub> 세정과정 시 미세오염물의 탈착 메커니즘 연구

석종원<sup>†</sup> · 이성훈\* · 김필기\* · 이주홍\*

<sup>†</sup>중앙대학교 기계공학부, \*중앙대학교 기계공학부 대학원

### A dynamic analysis on minute particles' detachment mechanism in a cryogenic CO<sub>2</sub> cleaning process

Jongwon Seok<sup>†</sup>, Seonghoon Lee\*, Pilkee Kim\* and Juhong Lee\*

<sup>†</sup>Sch. of Mech. Eng at Chung-Ang Univ., \*Grad. Sch. of Mech. Eng at Chung-Ang Univ.

#### ABSTRACT

Rapid increase of integrity for recent semiconductor industry highly demands the development of removal technology of contaminated particles in the scale of a few microns or even smaller. It is known that the surface cleaning technology using CO<sub>2</sub> snow has its own merits of high efficiency. However, the detailed removal mechanism of particles using this technology is not yet fully understood due to the lack of sophisticated research endeavors. The detachment mechanism of particles from the substrates is known to be belonged in four types; rebounding, sliding, rolling and lifting. In this study, a modeling effort is performed to explain the detachment mechanism of a contaminant particle due to the rebounding caused by the vertical collision of the CO<sub>2</sub> snow. The Hertz and Johnson-Kendall-Roberts(JKR) theories are employed to describe the contact, adhesion and deformation mechanisms of the particles on a substrate. Numerical simulations are followed for several representative cases, which provide the perspective views on the dynamic characteristics of the particles as functions of the material properties and the initial inter-particle collision velocity.

**Key Words :** Cryogenic carbon dioxide cleaning, Sub-micron contaminant particles, Particle removal mechanism, Rebounding detachment mechanism, Adhesion energy

## 1. 서 론

반도체 공정에서 공정변수 등에 의해 부착되는 미세 오염물들은 반도체 회로가 고집적, 고성능화에 따라서 반도체 부품이나 디스플레이 장비 등의 수율과 디바이스 성능 및 신뢰성에 치명적인 영향을 미친다[1,2]. 따라서 미세 오염물 제거를 위한 세정은 제품의 수율 향상 및 신뢰성 확보를 위하여 필수적인 공정으로 대두되고 있다.

한편, 반도체 공정에서 발생하는 오염물들은 크게 세 가지(유기 오염물, 금속 불순물, 미세입자)로 나눌 수 있다. 특히, 이러한 오염물 중 기계-전기적인 힘 또는 화학적인 힘[3,4] 등에 의해 부착되는 미크론 이하(Submicron) 규모의 미세입자는 작동유체의 유동경계

층(Boundary layer) 내에 위치하기 때문에 이의 제거는 매우 어렵다[5].

서브미크론 규모의 미세입자의 세정을 위하여 개발된 방법 중 극저온 CO<sub>2</sub> 세정법(Cryogenic CO<sub>2</sub> cleaning method)[6]은 고상의 CO<sub>2</sub> (Dry-ice)를 기상의 CO<sub>2</sub>와 함께 분사함으로써 유동경계층 내에 위치한 미세입자를 효율적으로 제거할 수 있는 방법이다. 또한 이 방법은 고상 CO<sub>2</sub>의 승화작용에 의해 잔유물을 거의 남기지 않고, 유해폐기물의 배출도 문제가 되지 않기 때문에 환경친화적이며, 열충격(Thermal impact) · 열영동(Thermophoresis) 효과로 오염물 제거효율을 향상시키는 등의 장점에 기인하여 그 영역을 급속히 확장하고 있다.

비록 근래에 극저온 CO<sub>2</sub>를 이용한 세정방법이 반도체 집적회로(Integrate Circuit; IC)나 LCD 제조에 필수적인 기술로 인식이 되고 있지만 효율이나 경제성 등에서 많은 이슈 및 문제점들을 내포하고 있다. 이러한

<sup>†</sup>E-mail : seokj@cau.ac.kr

이슈들을 해결하기 위한 연구측면의 접근방법 중, 예를 들면 응착(Adhesion), 충돌(Collision) 등의 메커니즘 규명은 트라이볼로지-동역학적 측면의 접근을, 이외의 다른 이슈들, 예를 들면 핵형성(Nucleation)이나 열영동, 응결(Condensation) 및 유동 등의 메커니즘 규명은 유체역학-열역학/열전달적 측면의 접근을 필요로 한다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 현재까지 많은 연구가 수행되고 있으며 그 결과 많은 개선 또한 이루어지고 있다[6,7,8]. 그러나 대부분의 연구가 모델의 난해함에 비해 지나치게 단순화된 모델을 바탕으로 한 초보적인 수준에 국한되거나[7] 시행오차 방법에 의존하고 있다[6]. 이러한 노력에도 불구하고 아직 해결되지 못한 근본적인 문제는 아이러니하게도 충돌에 의한 미세입자의 제거 메커니즘의 원리적인 규명에 있다. 따라서 극저온 CO<sub>2</sub> 세정 공정을 통한 최적의 세정공정 장치 및 제조 공정 자체의 설계를 위하여 미세입자의 제거 메커니즘을 규명하기 위한 노력이 수반되어야 한다.

본 연구에서는 기저부 표면에 접촉되어 있는 미세입자와 CO<sub>2</sub> 입자 사이의 충돌에 의한 미세입자의 탈착 메커니즘에 대한 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 모델링 및 시뮬레이션을 통하여 미세입자의 크기 및 CO<sub>2</sub> 입자와 미세입자 사이의 충돌속도에 따른 미세입자의 동적 거동을 모사함으로써 각 인자에 따른 미세입자의 탈착 거동을 분석하고, CO<sub>2</sub> 입자와 미세입자 사이의 충돌에 의한 미세입자의 제거 메커니즘을 규명하고자 하였다.

## 2. 이 론

### 2.1. 이론적 배경

극저온 CO<sub>2</sub> 세정에서 CO<sub>2</sub> 입자와 미세입자 사이의 충돌에 의한 미세입자의 동적 거동은 CO<sub>2</sub> 입자가 기저부 표면에 접촉되어 있는 미세입자와 충돌함으로써 운동량(Momentum)을 전달받아 야기된다. 이러한 미세입자의 탈착 메커니즘에는 크게 네 가지(rebounding, sliding, rolling and lifting)가 있다고 알려져 있다. 본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 입자와 기저부 표면 위에 접촉된 미세입자 사이의 수직 충돌에 의한 운동량 전달로써 미세입자가 리바운드되는 메커니즘을 모델링 하였다. Fig. 1은 CO<sub>2</sub> 입자와 기저부 표면 위에 접촉된 미세입자 사이의 수직 충돌에 의한 미세입자의 리바운드 탈착 메커니즘에 대한 개념도이다.

CO<sub>2</sub> 입자와 미세입자 사이의 접촉 및 변형에 관한 메커니즘은 Hertz의 접촉 이론[9], 미세입자와 표면 사이의 응착 및 변형에 관한 메커니즘은 점착 에너지를 고려한 JKR 이론[10]을 기초로 모델링 하였다. 한편,

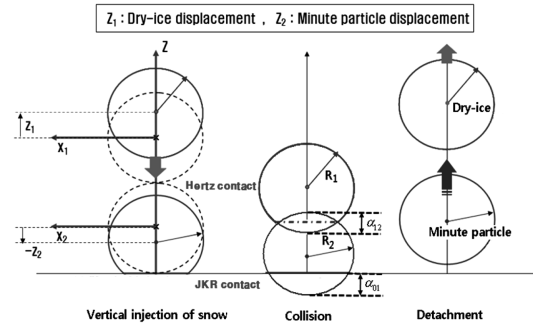


Fig. 1. Schematic diagram of rebounding detachment mechanism of minute particle.

해석을 위하여 기저부 표면과 입자들의 표면은 부드럽고 물질 사이의 점착과 충돌에 따른 변형은 소성변형이 없는 완전탄성체로 가정하였다. 또한 각 입자는 구형의 형태로 모델링 하였으며 나노 스케일의 환경에서는 매우 작은 물질의 질량과 물질간의 매우 가까운 거리로 인하여 중력장 내에서 작용하는 힘이 약해지기 때문에 중력에 의한 효과는 무시하였다.

### 2.2. 운동방정식

Hertz이론으로부터 미세입자와 CO<sub>2</sub> 입자 사이의 변형량( $\alpha_{12}$ )과 접촉력( $F_{12}$ )의 관계는 식 (1)과 같다. 또한 JKR 이론으로부터 기저부와 미세입자 사이의 접촉 반경(Contact radius;  $a_{01}$ )과 응착력( $F_{01}$ )의 관계는 식 (2)와 같다.

$$F_{12} = \frac{4}{3} E_{12}^* \sqrt{R_{12}^*} \alpha_{12}^{3/2} \quad (1)$$

$$a_{01}^3 = \frac{3R_{01}}{4E_{01}^*} \left\{ F_{01} + 8\pi\gamma R_{01} + \sqrt{6\pi\gamma R_{01}^* F_{01} + (3\pi\gamma R_{01}^*)^2} \right\} \quad (2)$$

식 (2)에서  $\gamma$ 는 미세입자와 기저부 사이의 표면에너지(Surface energy)이고, 식 (1)과 (2)에서 유효 탄성계수(Effective young's modulus;  $E^*$ )와 유효 입자 반경은(Effective particle radius;  $R^*$ ) 다음과 같다.

$$E_{12}^* = \left( \frac{1-V_1^2}{E_1} + \frac{1-V_2^2}{E_2} \right)^{-1}, \quad E_{01}^* = \left( \frac{1-V_0^2}{E_0} + \frac{1-V_1^2}{E_1} \right)^{-1}$$

$$R_{12}^* = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}, \quad R_{01}^* = \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} \right)^{-1}$$

여기에서  $E_1, E_2, E_3$  및  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ 는 각각 기저부, 미세입자 및 CO<sub>2</sub> 입자의 탄성계수와 푸와송비(Poisson's ratio)이다.

또한 JKR 이론으로부터 미세입자와 기저부 사이의

접촉 반경과 변형량( $\alpha_{01}$ ) 사이의 관계는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_{01}^2 = R_{10}^* \left( \alpha_{01} + \sqrt{\frac{2\pi\gamma\alpha_{01}}{E_{10}^*}} \right) \quad (3)$$

$$\alpha_{01} = H(R_1 - (\alpha_{01})_c - Z_1) \cdot (R_1 - Z_1) \quad (4)$$

이때, 식 (4)에서  $(\alpha_{01})_c$ 는 미세입자가 기저부로부터 탈착되는 순간에 미세입자와 기저부 사이의 표면에너지에 의한 미세입자의 임계 변형량이고,  $H(\ )$ 는 Heaviside function이다. 또한 미세입자와 CO<sub>2</sub> 사이의 변형량,  $\alpha_{12}$ 는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha_{12} = H\{(R_1 + R_2) - \alpha_{01} - (Z_2 - Z_1)\} \cdot \{(R_1 + R_2) - (Z_2 - Z_1)\} \quad (5)$$

한편, Fig. 1의 개념도로부터 미세입자와 CO<sub>2</sub> 입자의 지배방정식은 각각 식 (6)과 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$m_1 \ddot{Z}_1 = F_{01} - F_{12} \quad (6)$$

$$m_2 \ddot{Z}_2 = F_{12} \quad (7)$$

이때,  $m_1, m_2$ 는 각각 미세입자와 CO<sub>2</sub> 입자의 질량이다.

### 2.3. 시뮬레이션

본 연구에서는 상기 접촉, 응착 및 변형 이론과 미세입자와 CO<sub>2</sub> 입자 사이의 수직 충돌에 대한 동적 모델링을 바탕으로 Symbolic Language 프로그램인 Maple을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 미세입자와 CO<sub>2</sub> 입자에 대한 초기 조건은 각각 식 (8)과 (9)와 같다.

$$Z_1(0) = R_1 - (\alpha_{01})_0, \quad \dot{Z}_1(0) = 0 \quad (8)$$

$$Z_2(0) = 2R_1 + R_2, \quad \dot{Z}_2(0) = (\dot{Z}_2)_0 \quad (9)$$

이때,  $(\alpha_{01})_0$ 는 미세입자와 기저부 사이의 표면에너지에 의한 미세입자의 초기 변형량이고,  $(\dot{Z}_2)_0$ 는 미세입자와 CO<sub>2</sub> 입자 사이의 초기 충돌 속도이다.

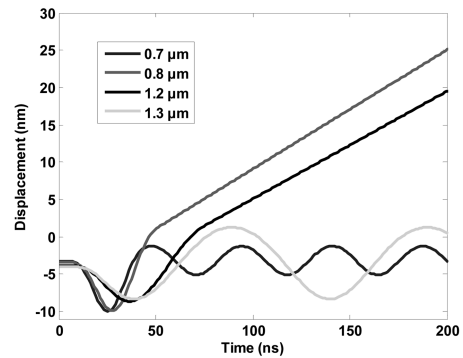
**Table 1.** Properties of each material

	Substrate (Si[11])	Minute particle (PTFE[12])	CO <sub>2</sub> particle[13]
Young's modulus(GPa)	156.7	0.53	8.9
Poisson's ratio	0.28	0.33	0.34
Density(kg/m <sup>3</sup> )	2300	2200	917
Surface energy (J/m <sup>2</sup> )	0.024		

한편, 본 시뮬레이션에 사용된 물질은 미세입자에 Polytetrafluoroethylene(PTFE), 기저부에 Silicon(Si)에 대한 물성치들을 예시로 사용 하였으며, 각 물질에 따른 물성치는 Table 1과 같다.

## 3. 결 과

아래 Fig. 2와 Fig. 3은 각각 미세입자의 반경과 미세입자에 대한 CO<sub>2</sub> 입자의 초기 충돌 속도에 따른 리바운딩 탈착 메커니즘의 동적 특성을 시뮬레이션을 통해 구한 것이다. 이들 결과에서 변위(Displacement)는 CO<sub>2</sub> 입자와 미세입자가 충돌하는 순간 미세입자의 질량중심점을 기준으로 계산되었다.



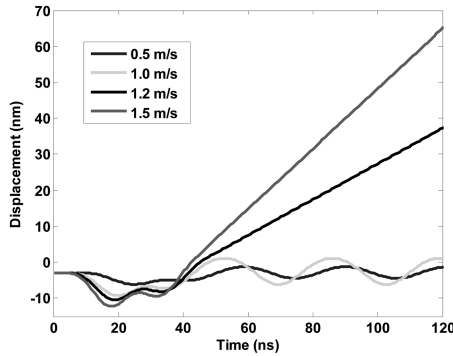
**Fig. 2.** Dynamic characteristic of rebounding detachment mechanism with respect to size of the particle. (CO<sub>2</sub> particle radius: 1 μm, Initial collision velocity: 1 m/s).

Fig. 2는 CO<sub>2</sub> 입자의 반경 및 미세입자와 CO<sub>2</sub> 입자 사이의 초기 충돌 속도를 각각 1 μm, 1 m/s로 고정시키고 충돌 후 미세입자의 반경에 따른 미세입자의 탈착 메커니즘을 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션에서 미세입자의 반경은 각각 0.7 μm, 0.8 μm, 1.2 μm, 1.3 μm로 가정하였다. 시뮬레이션 결과, Fig. 2에서 알 수 있듯이 0.8 μm 및 1.2 μm의 미세입자 반경에 대한 경우 미세입자가 기저부로부터 탈착 되지만 0.7 μm 및 1.3 μm의 미세입자 반경에 대한 경우 미세입자가 기저부로부터 탈착되지 않고 기저부에 잔존하는 것을 알 수 있다. 이러한 시뮬레이션 결과로부터 미세입자의 크기가 미세입자의 제거에 매우 중요한 인자라는 것을 알 수 있다. 즉, Fig. 2의 0.7 μm 크기의 미세입자 반경과 같이 미세입자의 크기가 작은 경우 표면과 미세입자간 응착력(Adhesion force) 증가, 1.3 μm 크기의 미세입자 반경과 같이 미세입자의 크기가 상대적으로 큰

경우 CO<sub>2</sub> 입자의 충돌에 의해 전달되는 운동량이 부족하기 때문에 미세입자가 기저부 표면에 잔존하게 되는 것으로 판단된다. 한편, 상기 시뮬레이션 결과를 표로 정리하면 아래 Table 2와 같다.

**Table 2.** Simulation results with respect to particle size

Particle size (μm)	Detachment (Success or Failure)
0.7	Failure
0.8	Success
1.2	Success
1.3	Failure



**Fig. 3.** Dynamic characteristic of rebounding detachment mechanism with respect to initial collision velocity. (Minute particle radius: 0.5 μm, CO<sub>2</sub> particle radius: 1 μm).

Fig. 3은 CO<sub>2</sub> 입자와 미세입자의 반경을 각각 1 μm, 0.5 μm로 고정시키고 초기 충돌 속도를 변수로 하여 리바운딩 탈착 메커니즘을 시뮬레이션한 결과이다. CO<sub>2</sub> 입자와 미세입자 사이의 초기 충돌 속도는 0.5 m/s, 1m/s, 1.2 m/s 및 1.5 m/s로 가정하였다. 시뮬레이션 결과 CO<sub>2</sub>의 낮은 속도에서는 미세입자가 기저부에 잔존하였다. 이러한 결과는 낮은 CO<sub>2</sub> 입자의 속도로 인하여 미세입자가 기저부 표면과 미세입자 사이의 응착력을 극복할 만큼의 충분한 운동량을 전달받지 못했기 때문이라고 생각할 수 있다. 그러나 과도한 CO<sub>2</sub> 입자의 속도는 연속적인 입자의 충돌의 결과로써 지속적인 충격에 의해 기저부 표면에 의도치 않은 손상을 야기할 수도 있음을 쉽게 예측할 수 있다. 한편, 상기 시뮬레이션 결과를 표로 정리하면 아래 Table 3과 같다.

2.2절에서 모델링한 결과를 이용하여 CO<sub>2</sub> 입자와 미세입자 사이의 수직 충돌에 의한 리바운딩 메커니즘의 수치해석을 수행한 결과를 종합하면 CO<sub>2</sub> 입자가 수직

**Table 3.** Simulation results with respect to initial collision velocity

Initial collision velocity (m/s)	Detachment (Success or Failure)
0.7	Failure
0.8	Failure
1.2	Success
1.3	Success

입사하는 경우 오염물과 기저부 사이의 응착력에 가장 큰 영향을 미치는 표면에너지와 초기충돌 시 전달되는 운동량이 미세입자가 기저부로부터 탈착하는 지의 여부에 가장 중요한 요소들을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기저부 표면에 점착되어 있는 미세입자와 CO<sub>2</sub> 입자 사이의 충돌에 의한 미세입자의 탈착 메커니즘에 대한 모델링과 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통하여 미세입자의 크기 및 CO<sub>2</sub> 입자와 미세입자 사이의 충돌속도에 따른 미세입자의 동적 거동을 모사함으로써 각 인자에 따른 미세입자의 탈착 거동을 분석하고, CO<sub>2</sub> 입자와 미세입자 사이의 충돌에 의한 미세입자의 제거 메커니즘을 규명하고자 하였다.

시뮬레이션 결과 CO<sub>2</sub> 입자가 수직 입사하는 경우 오염물과 기저부 사이의 응착력에 가장 큰 영향을 미치는 표면에너지와 점착된 미세입자에 전달되는 운동량의 크기가 미세입자의 탈착여부를 결정짓는 가장 중요한 요소라는 결론을 도출하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2007-331-D00035)이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. T. Hattori, "Contamination control: Problems and prospects", *Solid State Technol.*, Vol. 33, No. 7, pp. 1-8, 1990.
2. T. Hattori and S. Koyate, "An automated particle detection and identification system in VLSI wafer processing", *Solid State Technol.*, Vol. 34, No. 9, pp. 1-6, 1991.

3. R. Maboudian, W. R. Ashurst and C. Carraro, "Self-assembled monolayers as anti-stiction coatings for MEMS: characteristics and recent developments", *Sensors and Actuators A*, Vol. 82, No. 1, pp. 219-223, 2000.
4. Y.-P. Zhao, "Morphological stability of epitaxial thin elastic films by van der waals force", *Arch. Appl. Mech.* Vol. 72, No. 1, pp. 77-84, 2002.
5. U. C. Sung, C. N. Yoon, S. G. Kim, "Surface cleaning by ice-particle jet(II): preparation of contaminated surface and its cleaning", *Korean J. of Chem. Eng.*, Vol. 14, No. 1, pp. 15-22, 1997.
6. D. R. Linger, "CO<sub>2</sub>(dry-ice) particle blasting as a mainstream cleaning alternative", *Particles on Surfaces 5&6: Detection, Adhesion and Removal*, pp. 203-220, 1999.
7. S. Banerjee, C. C. Lin, S. Su, H. F. Chung, W. Brandt and K. Tang, "Cryogenic aerosol cleaning of photomasks", *Proc. SPIE*, Vol. 5853, No. 1, pp. 90-99, 2005.
8. R. Kohli, "Precision cleaning and processing in industrial applications", *Particles and Surfaces 5&6: Detection, Adhesion and Removal*, pp. 117-134, 1999.
9. K. L. Johnson, *Contact Mechanics*, Cambridge Univ. Press, NY, 1985.
10. K. L. Johnson, K. Kendall, A. D. Roberts, "Surface energy and the contact of elastic solids", *Proc. R. Soc. London, Ser A*, Vol. 324, No. 1558, pp. 301-313, 1971.
11. N. Arnold, G. Schrems, "Dynamic particle removal by nanosecond dry laser cleaning: theory", *Proc. SPIE*, Vol. 4426, pp. 340-346, 2002.
12. N. Iyer, N. Saka, J. H. Chun, "Contamination of silicon surface due to contact with solid polymers", *IEEE trans. Semi. Manufacturing*, Vol. 14, No. 2, pp. 85-96, 2001.
13. Toscano, Christopher, Ahmadi, Goodarz, "Particle removal mechanism in cryogenic surface cleaning", *J. Adhesion Sci*, Vol. 79, No. 2, pp. 175-201, 2003.

---

접수일: 2008년 11월 12일, 심사일: 2008년 11월 27일  
 게재확정일: 2008년 12월 12일