

극저온 CO₂ 세정공정을 위한 거친표면 위 미세입자의 점착특성 연구

석종원[†] · 이성훈* · 김필기*

[†]중앙대학교 기계공학부, *중앙대학교 기계공학부 대학원

A Study of Minute Particles' Adhesion on a Rough Surface for a Cryogenic CO₂ Cleaning Process

Jongwon Seok[†], Seonghoon Lee and Pilkee Kim

[†]School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

*Graduate School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

ABSTRACT

Among a variety of cleaning processes, the cryogenic carbon dioxide (CO₂) cleaning has merits because it is highly efficient in removing very fine particles, innocuous to humans and does not produce residuals after the cleaning, which enables us to extend its area of coverage in the semi-conductor fabrication society. However, the cryogenic carbon dioxide cleaning method has some technical research issues in aspect to particles' adhesion and removal. To resolve these issues, performing an analysis for the identification of particle adhesion mechanism is needed. In this study, a research was performed by a theoretical approach. To this end, we extended the G-T (Greenwood-Tripp) model by applying the JKR (Johnson-Kendall-Roberts) and Lennard-Jones potential theories and the statistical characteristics of rough surface to investigate and identify the contact, adhesion and deformation mechanisms of soft or hard particles on the rough substrate. The statistical characteristics of the rough surface were taken into account through the employment of the normal probability distribution function of the asperity peaks on the substrate surface. The effects of surface roughness on the pull-off force for these particles were examined and discussed.

Key Words : Cryogenic carbon dioxide cleaning, Contact mechanism, Particle adhesion mechanism, Adhesion modeling, Rough surface, G-T model, JKR model, Lennard-Jones potential

1. 서 론

반도체 유관 부품이나 LCD(Liquid Crystal Display) 및 PDP(Plasma Display Panel) 등의 초소형전자공학(Microelectronics)에서 이들 회로가 고밀도로 집적됨에 따라 공정변수 또는 주위 변수에 의해 부착되는 오염물은 수율 및 품질 신뢰성에 결정적인 영향을 미친다 [1,2]. 따라서 오염물 제거를 위한 세정은 제품의 품질 및 기능을 향상시키며 후속 공정을 원활히 수행하는데 필수적인 공정으로 대두되고 있다. 그러나 현재 반도체 산업에서 오염물을 제거하는 고도 세정과정은 대부분 초순수(Ultrapure Water; UPW)나 화학제 등을 사용하

는 습식세정법이 주로 사용되고 있고, 이는 초순수 사용에 따른 에너지, 황산이나 불산 등 유해 화학물질 사용 등의 환경에 치명적인 기술적 문제들을 안고 있다.

한편, 이러한 세정공정에서 특히 문제가 되는 오염물들은 이들 부품에 부착되는 마이크론 이하 크기의 미세입자로 이들은 작동유체의 유동경계층(Boundary layer) 내에 위치함으로 인해 제거가 매우 어렵다고 알려져 있다[3].

이러한 문제점을 극복하기 위해 개발된 방법 중 Edwin Rice가 고안한 극저온 CO₂ 세정법(Cryogenic CO₂ cleaning method)[4]은 고상의 CO₂(Dry-ice)를 기상의 CO₂와 함께 분사하는 방법이다. 이 방법은 고상의 CO₂가 발생시키는 기계적 모멘텀을 유동경계층 내의 입자에 직접 전달함으로써 기존의 건식세정법으로

[†]E-mail : seokj@cau.ac.kr

는 제거가 어려웠던 미세입자를 효율적으로 제거할 수 있는 장점이 있다. 이러한 세정공정은 많은 공정변수를 내포하고 있기 때문에 이를 최적화시키기 위해 현재까지도 많은 연구가 수행되고 있으나 [4,5,6,7] 아직 충분히 설명되지 못하는 문제 중 하나는 미세입자의 점착 메커니즘의 규명을 통한 이의 효율적인 제거에 관한 것이다.

CO₂ 입자의 충돌에 의한 미세입자 제거 메커니즘의 규명은 전술한 이슈들을 해결하기 위한 근본적인 접근 방법으로 접촉, 응착, 충돌 및 유동 등 기본 메커니즘의 원리에 기초하며, 이 중 접촉은 탄성접촉을 가정하여 정립된 Hertz의 접촉이론(Contact theory)[8]에서 출발한다. 이를 바탕으로 표면거칠기 (Surface roughness)를 통계적으로 고려한 접촉모델인 Greenwood-Williamson(G-W) 모델[9]과 구형입자의 접촉을 고려하여 이를 확장시킨 Greenwood-Tripp(G-T) 모델[10]은 거친 표면에 접촉되어 있는 단일입자 (Single Particle)의 접촉력과 이에 기인하는 변형거동을 잘 설명하는 모델들로 인정받고 있다.

한편, 응착은 Hertz의 접촉이론을 바탕으로 1932년 Bradley가 Dupré의 응착일을 도입하여 두 강체 사이의 응착력을 계산한 이후[11], Johnson, Kendall, Roberts는 두 유연한 탄성체 사이의 응착/접촉력을 Hertz의 탄성 접촉모델을 확장하여 유도하였다(JKR 모델)[12]. 또한 Derjaguin, Muller, Toporov는 비교적 강한 탄성체의 응착/접촉모델을 제안하였는데(DMT 모델)[13]이 두 모델들 사이의 모순된 결과는 Muller 등이 Tabor 수[14]를 도입하여 완전한 수치적인 해를 구함[15]으로써 설명할 수 있을 때까지 오랜 기간 학계의 난제로 남아 있었다. 한편 Maugis는 Dugdale의 포텐셜을 도입하여 JKR과 DMT 모델 사이의 천이영역에 대한 모델(M-D 모델)을 정립하였으며[16], 탄성구의 응착 또는 접촉력에 대한 Hertz, Bradley, JKR, DMT 및 Maugis 모델이 적용될 수 있는 영역을 도기한 Johnson-Greenwood Map[17]이 완성됨으로써 구형입자의 매끄러운 표면에 대한 기본 응착/접촉모델들의 타당성이 정립되었다.

그러나 실제 반도체나 LCD의 생산공정에서 문제가 되는 미세입자는 미시적인 관점에서 보면 거친 표면 위에 다양한 형태의 기하학적 조건과 힘으로 응착이 되어 있는데 반해 상기 설명한 이들 모델 또는 이론들은 각각 단순히 접촉력만을 고려하거나[18], 미시적인 관점에서 실제 기저부의 거친 표면을 고려하지 않고 있거나[12,13,16] 또는 평판의 응착만을 대상으로 하고 있으며[19-21], 이들을 함께 고려하여 확장한 모델과

Lennard-Jones Potential을 결합한 모델에 대한 연구 [22]가 일부 수행된 바 있으나 아직까지는 극히 미미한 수준이다.

본 연구에서는 거친 표면을 가진 기저부와 유연한 입자의 점착을 고려하기 위해 G-T모델을 적용하고 여기에 JKR 이론을 도입한 후 여기에 거친 표면에 의한 돌기들의 영향을 고려하여 확장한 모델을 개발하였다. 또한 이 모델을 이용하여 접촉력과 Pull-off 힘을 계산하고 이들 힘에 대한 표면거칠기의 영향을 고찰하였다. 또한 비교적 강성이 높은 입자의 점착을 고려하기 위해 JKR 모델 대신 Lennard Jones Potential 이론을 적용하여 Tabor 수와 기저부의 표면거칠기에 따른 기저부와 미세입자 사이의 점착 특성을 구하고 Pull-off 힘에 대한 표면거칠기의 영향을 고찰하였다.

2. 본 론

본 연구에서는 미세입자의 형상은 완전한 구형이며 이 미세입자는 거친 표면의 평판 위에 점착되어 있다고 가정하였다. 이를 바탕으로 거친 표면의 기저부에 점착된 미세입자의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다.

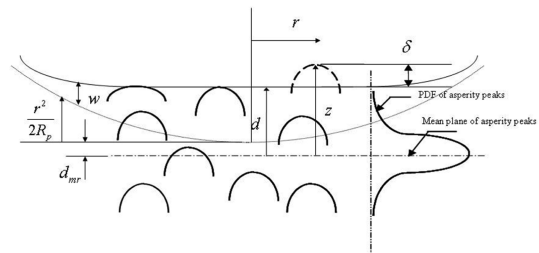


Fig. 1. Schematic of a particle adhered to the substrate with rough surface.

이 그림에서 R_p 는 미세입자의 반경을 나타내고, r 은 입자의 중심과 기저부 표면의 수선이 만나는 선을 기준으로 입자의 반경방향으로 측정된 좌표축을 나타낸다. 또한 z 는 돌기높이의 평균면을 기준으로 측정된 좌표축을 나타내며 d_{mr} 과 d 는 각각 이 평균면과 입자의 원래표면 사이의 거리와 변형된 입자표면 사이의 거리를 나타낸다. 그리고 d 는 돌기의 침투거리 (Penetration depth 또는 Interference)를, w 는 입자의 변형을 나타낸다. 한편, 이 그림으로부터 분리거리

$$d(r) = d_{mr} + \frac{r^2}{2R_p} + w(r) \quad (1)$$

의 관계를 얻을 수 있으며

$$z=z(r)=d(r)+\delta(r)$$

$$\text{또는 } \delta(r)=z(r)-d(r) \quad (2)$$

의 관계를 유도할 수 있다. 여기서 한편, 돌기높이의 확률밀도함수가 정규분포를 따른다고 가정하면 이는

$$\varphi(z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s}e^{-\frac{z^2}{2\sigma_s^2}} \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 σ_s 는 표면거칠기를 나타낸다. Hertz 접촉을 가정한 G-T모델과 타원적분함수(Elliptic integral function)의 정의로부터 미세입자의 변형은

$$w(r)=\begin{cases} \frac{2}{E^*}\int_0^{3\sigma_s} p(\xi)d\xi & \text{for } r=0 \\ \frac{2r}{E^*}\int_0^{\xi_{\max}} p(r\xi)L(\xi)d\xi & \text{for } r>0 \end{cases} \quad (4)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 $E^{*-1}=(1-n_1)/E_1+(1-n_2)/E_2$ 이고 E 는 영률을, n 는 포와송 비를 나타내며 하첨자 1과 2는 각각 미세입자와 기저부를 나타낸다. 한편, 여기서 ξ_{\max} 는 계산의 효율성을 제고하기 위해 r_{\max}/r 로 정의하여 사용하였으며 P 는 입자표면에 작용하는 압력을 나타낸다. 또한 이 식에서

$$L(\xi)=\begin{cases} \frac{2}{\pi}\xi K(\xi) & \text{for } \xi<1 \\ \frac{2}{\pi}K(1/\xi) & \text{for } \xi>1 \end{cases} \quad (5)$$

이고[10] 여기서 $K(x)$ 는 모듈러스가 ξ 인 타원적분함수이다. 따라서 분리거리 $d(r)$ 은 식 (1)과 (4)로부터 계산될 수 있다. 접촉부의 압력은 다음과 같이 구할 수 있다. 즉, JKR 모델로부터 침투거리 $\delta(r)$ 은[8]

$$\delta(r)=\frac{\pi a}{2E^*}(p_H+2p_a) \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 P_H 는 $2a_c E^*/(\pi R_s)$ 로 나타낼 수 있는 Hertz 접촉압력을, P_a 는 $-\sqrt{4\Delta\gamma E^*/(\pi a_c)}$ 로 나타낼 수 있는 점착력에 의한 압력을 나타낸다. 여기서 $\Delta\gamma$ 는 점착에너지를 나타내며 a_c 는 접촉반경을 나타낸다. 따라서 이들을 이용하여 식 (6)을 다시 표현하면

$$4a_c^4 E^{*2} - 8R_s a_c^2 E^{*2} \delta + 4R_s^2 \delta^2 E^{*2} + 16\pi R_s^2 a_c \Delta\gamma E^* = 0 \quad (7)$$

의 a_c 의 4차 대수방정식을 얻을 수 있으며 이를 풀어 d 의 함수로 전개된 a_c 에 대한 엄밀해를 구할 수 있다. 따라서 여기서 구한 a_c 로부터 하나의 돌기에 대한 점착압력

$$p_\delta(r)=\left(\frac{2}{3}p_H+2p_a\right)\pi a_c^2 \quad (8)$$

을 d 의 함수로 구할 수 있으며 이 결과로 얻은 식으로부터 입자표면의 한 점에 작용하는 모든 돌기들의 효과를 포함한 압력

$$p(r)=\int_{-3\sigma_s}^{3\sigma_s} p_\delta(r;z(r,\delta))\varphi(z)dz \quad (9)$$

을 구할 수 있다. 따라서 입자에 작용하는 힘은 식 (9)를 접촉반경에 대해 적분하여 구할 수 있으며 이의 형태는 다음과 같다:

$$P=\eta\int_0^{r_{\max}} 2\pi p(r)dr \quad (10)$$

여기서 h 는 단위면적당 존재하는 돌기의 수를 나타낸다.

한편, 식 (4)를 구하기 위해 필요한 입자 표면에 작용하는 압력 프로파일 $p(r)$ 은 초기에는 임의로 가정한 후 식 (9)까지 계산을 수행하여 새로운 $p(r)$ 을 구하고 이들 식의 반복적인 계산을 통해 전체 계산식들을 수렴시키는 과정을 통하게 된다. 이 때, 계산의 수렴성을 향상시키기 위해 압력결과를 Relaxation 시키며 변동시켜 나간다. 한편, JKR 모델 대신 Lennard-Jones potential 모델[22] (Fig. 2 참조)을 사용하여 계산을 수행하는 경우 식 (8) 대신

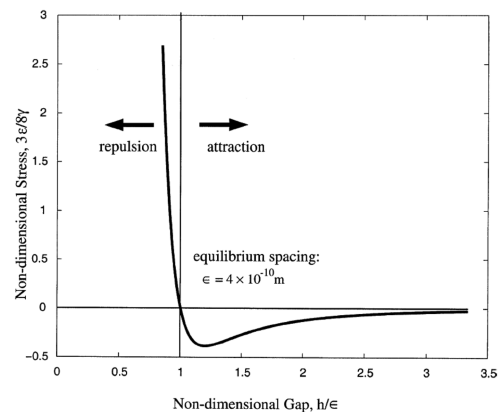


Fig. 2. The stress-separation relationship according to the Lennard-Jones law[23].

$$p_{\delta}(r) = \frac{8\Delta\gamma}{3\varepsilon} \left[\left(\frac{\varepsilon}{d(r) + \varepsilon - z(r)} \right)^3 - \left(\frac{\varepsilon}{d(r) + \varepsilon - z(r)} \right)^9 \right] \quad (11)$$

을 이용하여 계산한다. 단 여기에서 추가로 도입한 e 은 원자분리거리 (Atomic separation distance) 또는 평형거리 (Equilibrium spacing)를 의미한다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 GT 모델에 JKR 모델을 도입한 후 거친표면에 대한 영향을 고려하여 확장하여 매끈한 표면의 미세입자와 거친 표면의 기저부 사이의 응착에 대한 모델링을 수행하고, Maple[24]과 Matlab[25]를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 이를 통해 거친 표면을 가진 기저부 돌기들의 제곱 평균 거칠기에 따른 영향을 고찰하였다. JKR모델은 유연한 물체간 접촉에 타당한 결과를 주기 때문에 거친 표면의 기저부로 Silicon, 매끈한 표면의 미세입자로 매우 유연한 PTFE를 가정하였으며, 각 물질에 대한 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1. Material properties used in the GT-JKR model[26]

	Substrate (Silicon)	Minute particle (PTFE)
Young's modulus(GPa)	156.7	0.53
Poisson's ratio	0.28	0.33
Surface energy(J/m ²)	0.294	
Particle radius(mm)	-	0.5
Asperity radius(mm)	0.02	-
Asperity density(ea/m ²)	1000*10 ¹²	-
Surface roughness standard deviation(nm)	2.5, 3.0, 3.5, 4.0	-

Fig. 3는 기저부 돌기들의 제곱 평균 거칠기에 대하여 미세입자의 표면과 기저부의 돌기들의 평균 높이 사이의 거리에 따른 접촉력에 대한 컴퓨터 계산 결과이다. Fig. 3에 도시한 결과에서 알 수 있듯이 미세입자와 기저부 사이의 거리가 증가할수록 미세입자와 기저부 사이의 접촉력은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 미세입자와 기저부 사이의 거리가 증가할수록 미세입자와 접촉하는 기저부 표면 돌기의 수가 가우스 확률 밀도함수에 따라서 감소하기 때문이다. 또한 기저부 표면의 거칠기가 증가할수록 미세입자와 기저부 사이의 접촉력은 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 기저부 표면

의 거칠기가 증가할수록 동일한 미세입자와 기저부 사이의 거리에서 미세입자와 접촉하는 기저부 표면 돌기의 수가 증가하기 때문이다. 또한 미세입자와 거친 표면의 사이의 응착력은 미세입자와 기저부 사이의 거리에 따라서 약 5배~100배 이상의 큰 차이가 나며, 결론적으로 미세입자와 기저부 사이의 접촉력은 표면거칠기에 지배적인 영향을 받는다는 사실을 도출할 수 있다.

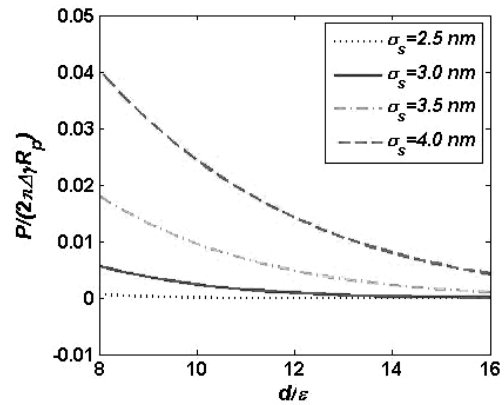


Fig. 3. Contact force with respect to the separation distance of the GT-JKR model.

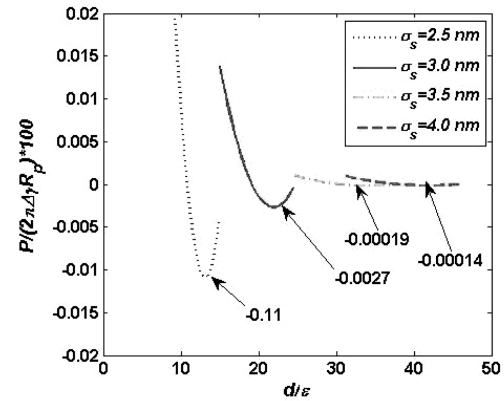


Fig. 4. Pull-off force with respect to the surface roughness of the GT-JKR model.

Fig. 4는 기저부 돌기들의 제곱 평균 거칠기에 대하여 미세입자와 기저부 사이의 Pull-off 힘에 대한 컴퓨터 계산 결과이다. 본 시뮬레이션 결과 기저부 표면 돌기들의 제곱 평균 거칠기가 2.5 nm에서 3.0 nm로 증가 시 Pull-off는 제곱 평균 거칠기 2.5 nm에 대하여 약 75.2% 감소하였고, 3.5nm로 증가 시 약 98.2% 감소하였다. 또한 기저부 표면 돌기들의 제곱 평균 거칠기가 2.5 nm에서 4.0 nm로 증가 시 Pull-off는 제곱 평

균 거칠기 2.5 nm에 대하여 약 98.7% 감소하였다. 이러한 시뮬레이션 결과로부터 물질 사이의 접촉력 뿐만 아니라 표면거칠기가 물질 사이의 점착력에 매우 큰 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다.

Table 2. Materials properties used in the Lennard-Jones Potential model along with the surface roughness[27]

	Substrate (Silicon)	Minute particle (Alumina)
Young's modulus(GPa)	94	372
Poisson's ratio	0.17	0.22
Particle radius(m)	-	0.02×10^{-6}
Surface energy(J/m ²)	0.0492	
Tabor number	0.05	
Surface roughness standard deviation(Å)	0.0, 0.8, 1.6, 2.4, 3.2	-

또한, 본 연구에서는 상기 G-T모형을 기본으로 적용하고 JKR 모델 대신 Lennard-Jones Potential 모델을 도입하여 강성이 높고 매끈한 표면의 미세입자와 거친 표면의 기저부 사이의 점착에 대한 모델링을 수행하고, 기저부 표면거칠기에 따른 Pull-off 힘에 대한 컴퓨터 계산을 수행하였다. 거친 기저부 표면의 제곱 평균 거칠기는 이전과 동일하게 가우스 확률분포를 가정하였고, 거친 표면의 기저부로 Silica, 강성이 높은 매끈한 표면의 미세입자로 Alumina를 가정하였으며, 각 물질에 대한 물성치는 Table 2와 같다.

Fig. 5는 0.05의 Tabor 수 $([R_p(\Delta)^2/(E^* \epsilon^3)]^{1/3})$ 에 대하여 기저부 표면거칠기에 따른 Pull-off 힘의 컴퓨터 계산 결과이다. 본 시뮬레이션 결과 기저부의 표면 거

칠기에 따른 Pull-off 힘은 기저부의 표면 거칠기가 0.2e의 경우 매끈한 표면에 대한 Pull-off 힘에 비해 약 34% 감소하였고, 0.4e의 경우 71% 감소하였다. 또한 기저부의 표면 거칠기가 0.6e의 경우 매끈한 표면에 대한 Pull-off 힘에 비해 약 86% 감소하였고, 0.8e의 경우 92% 감소하였다. 이러한 시뮬레이션 결과로부터 GT-JKR 모델과 마찬가지로 표면거칠기가 물질 사이의 점착력에 지배적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 하나의 이론적 접근으로서 G-T 모델을 기본으로, JKR 이론과 Lennard Jones Potential 이론을 적용, 이들을 확장하여 거친 표면의 기저부와 미세입자가 점착되어 있는 경우에 대하여, 표면거칠기에 따른 점착 특성에 대한 모델링 연구를 수행하였다. 유연하고 부드러운 표면의 미세입자와 거친 표면의 기저부 사이의 점착 특성을 상기 확장한 GT/JKR 모델을 이용하여 분석한 결과 미세입자와 기저부 돌기들의 평균 높이 사이의 거리가 증가할수록 미세입자와 기저부 사이의 접촉력은 감소하였고, 강성이 높은 미세입자에 대한 G-T/Lennard-Jones potential 모델의 경우도 이전의 결과와 유사하게 기저부의 표면거칠기가 미세입자와 기저부 사이의 접촉력과 점착력에 대하여 절대적인 영향을 미친다는 결론을 도출할 수 있었다. 따라서 기저부의 거칠기를 고려하지 않는 경우 이론치는 실제 경우보다 훨씬 높게 계산될 수 있으며 이를 미세입자의 요구 제거력에 고려하여야만 극저온 CO₂ 세정공정의 최적화가 이루어 질 수 있으리라 사료된다. 또한 이러한 점착특성에 대한 연구를 바탕으로 향후 거친 기저부에 점착되어 있는 미세입자와 CO₂ 입자 사이의 충돌에 의한 미세입자의 탈착 메커니즘에 대한 모델링으로 확장이 가능하리라 생각된다.

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,

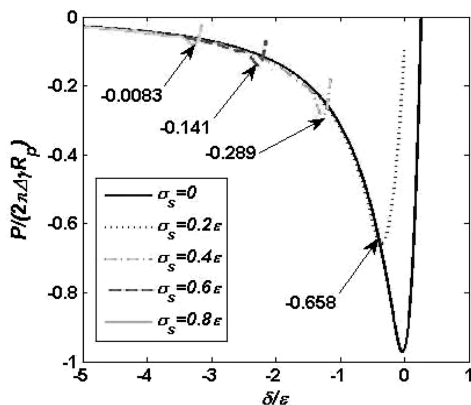


Fig. 5. Pull-off force with respect to the surface roughness of the Lennard-Jones potential model.

- 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. 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.
 4. D.R. Linger, "CO₂ (dry-ice) particle blasting as a mainstream cleaning alternative," *Particles on Surfaces 5&6: Detection, Adhesion and Removal*, pp. 203-220, 1999.
 5. S. Banerjee, C.C. Lin, S. Su, H. F. Chung, W. Brandt and K. Tang, "Cryogenic aerosol cleaning of photo-masks," *Proc. SPIE*, Vol. 5853, No. 1, pp. 90-99, 2005.
 6. R. Kohli, "Precision cleaning and processing in industrial applications," *Particles and Surfaces 5&6: Detection, Adhesion and Removal*, pp. 117-134, 1999.
 7. 석종원, 이성훈, 김필기, 이주홍, "극저온 CO₂ 세정과정 시 미세오염물의 탈착 메커니즘 연구," *반도체및 디스플레이장비학회지*, 제7권, 제4호, pp. 29-33, 2008.
 8. K. L. Johnson, *Contact Mechanics*, Cambridge Univ. Press, N.Y., 1985.
 9. J. A. Greenwood, J. B. P. Williamson, "Contact of nominally flat surfaces," *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, Vol. 295, No. 1442, pp. 300-319, 1966.
 10. J. A. Greenwood, J. H. Tripp, "The elastic contact of rough spheres," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 34, pp. 153-159, 1967.
 11. R. S. Bradley, "The cohesive force between solid surfaces and the surface energy of solids," *Philosophical Magazine*, Vol. 13, pp. 853-862, 1932.
 12. 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.
 13. B. V. Derjaguin, V. M. Muller, Y. P. Toporov, "Effect of contact deformations on the adhesion of particles," *J. Colloid Interface Sci.* Vol. 53, No. 2, pp. 314-326, 1975.
 14. D. Tabor, "Surface forces and surface interactions," *Colloid Interface Sci.* Vol. 58, No. 1, pp. 2-13, 1977.
 15. V. M. Muller, Y. S. Yushchenko, B. V. Derjaguin, "On the influence of molecular forces on the deformation of an elastic sphere and its sticking to a rigid plane," *J. Colloid Interface Sci.* Vol. 77, No. 1, pp. 91-101, 1980.
 16. D. Maugis, "Adhesion of spheres: The JKR-DMT transition using a dugdale model," *J. Colloid Interface Sci.* Vol. 150, No. 1, pp. 243-269, 1992.
 17. K. L. Johnson, J. A. Greenwood, "An adhesion map for the contact of elastic spheres," *J. Colloid Interface Sci.* Vol. 192, No. 2, pp. 326-333, 1997.
 18. Y. Zhao, L. Chang, "A model of asperity interactions in elastic-plastic contact of rough Surfaces," *J. Tribol.*, Vol. 123, No. 4, pp. 857-864, 2001.
 19. P. Sahoo, A. Banerjee, "Asperity interaction in adhesive contact of metallic rough surfaces," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 38, No. 22, 4096-4103, 2005.
 20. Y. I. Rabinovich, J. J. Adler, A. Ata, R. K. Singh, B.M. Moudgil, "Adhesion between nanoscale rough surfaces - I. Role of asperity geometry," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 232, No. 1, pp. 10-16, 2000.
 21. Y. I. Rabinovich, J. J. Adler, A. Ata, R. K. Singh, B.M. Moudgil, "Adhesion between Nanoscale Rough Surfaces - II. Measurement and Comparison with Theory," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 232, No. 1, pp. 17-24, 2000.
 22. W. Cheng, P. F. Dunn, R. M. Brach, "Surface roughness effects on microparticle adhesion," *J. Adhesion*, Vol. 78, No. 11, pp. 929-965, 2002.
 23. J. A. Greenwood, "Adhesion of Elastic Spheres," *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol. 453, No. 1961, pp. 1277-1297, 1997.
 24. Mathworks, Matlab™ version 6.5, Mathworks Inc., 2002.
 25. Maple™ Manual Release 5, Waterloo Maple Inc., 1997.
 26. N. Lyer, N. Saka, J. H. Chun, "Contamination of silicon surface due to contact with solid polymers," *IEEE. Trans. Semi. Manufacturing*, Vol. 14, No. 3, pp. 85-96, 2001.
 27. Q. Li, V. Rudolph, W. Peukert, "London-van der Waals adhesiveness of rough particles," *Powder Technol.*, Vol. 161, No. 3, pp. 248-255, 2006.
-
- 접수일: 2010년 2월 1일, 심사일: 2010년 2월 17일
 게재확정일: 2010년 2월 28일