

거칠기 돌기의 상호작용을 고려한 미세입자의 응착특성에 관한 연구

이창훈* · 이경훈* · 윤준호** · 신영의***

*중앙대학교 기계공학부 대학원

**여주대학 자동차과

***중앙대학교 기계공학부

A Study on the Adhesive Characteristics of Nano Scale Particles Considering Asperity Interaction

Chang-Hun Lee*, Kyong-Hun Lee*, Jun-Ho Yoon* and Young-Eui Shin***

*Graduate School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

**Department of Automobile Engineering, Yeojoo Institute of Technology, Yeojoo 469-705, Korea

***School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

Abstract

In this paper, elastic and plastic adhesion index was very important in deciding adhesive characteristics and varying elastic and plastic index, dimensionless load and pull-off force were analyzed and simulated. Finally, using AFM, experimental surface roughness parameters of substrates and pull-off force between tip and substrates were produced. Using these values, pull-off forces were calculated and were compared with experimental pull-off forces. Through simulation and experiment, it was found that interaction of asperity also had very important influence on adhesive contact

*Corresponding author : einstein2@wm.cau.ac.kr

(Received July 4, 2007)

Key Words : Work of adhesion, Adhesin index, Interaction, Pull-off force, AFM

1. 서 론

1.1 연구의 필요성

최근 미세가공 기술에 힘입어 대동된 마이크로/나노 기술은 기존의 기계요소에 비하여 그 크기가 작고 정밀한 작동을 하는 기계요소의 개발을 가능하게 하였으며, 이를 통하여, 정밀센서, 의료용 기기 및 정보저장기기의 혁신적 발전을 이룩할 수 있었다. 마이크로/나노 부품들이 작동 중 미소 표면력에 의하여 접촉된 두 표면 간의 응착력이 기계요소의 구동력보다 큰 경우, 미소 기계요소를 고착 시킬 뿐만 아니라 미소 표면 파손의 원인으로 작용하기 때문에 응착현상의 규명과 이에 따른 응착력 측정에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

이러한 기본적인 응착 접촉 이론들은 Hertz의 접촉 이론에서 출발한다. Hertz¹⁾는 접촉하중과 접촉반지름, 탄성계수, 접촉하는 구의 반지름과의 관계를 정의했다. 물론 응착력 항은 존재하지 않는다. 이를 기본으로 하여 Derjaguin, Muller, Toporov 과 Johnson, Kendall, Roberts 는 각각 DMT²⁾, JKR³⁾ 모델을 발표하였다. 이 두 이론들은 기본적으로 헤르츠 이론을 기반으로 하지만 각각 응착력이 발생하는 영역을 각각 접촉 영역 외부와 내부로 다르게 정의되었다. 또한 Maugis⁴⁾는 천이매개 변수를 정의하여 이 값을 정의하는 범위에 따라 JKR 이론과 DMT 이론의 결과치의 특성을 보임을 규명하였다. 그렇지만, 이 이론들은 기본적으로 탄성 접촉이라는 가정에서 출발하였으며, 접촉하는 표면들의 거칠기에 대해서는 고려하지 않았다. 이들 연구에는 거칠기의 높이, 곡률반경, 일정 면적에

대한 거칠기 밀도 등 여러 변수가 필요하고, 거칠기 돌기에 대한 이상적인 형상을 결정하는 것이 중요하다. 이들 접촉하는 두 물체 사이의 거칠기의 고려한 접촉 모델은 매끄러운 평면과 접촉하는 표면이 모두 같은 곡률 반경을 기초로 하는, Greenwood, Williamson이 1966년에 발표한 GW⁵⁻⁶⁾ 모델을 기초로 시작되었다. GW모델이라고 하는 이 모델은 가장 먼저 거칠기의 형상, 거칠기의 밀도, 거칠기 높이의 평균 값을 등을 가정하였다. 이를 기초로 W.R.Chang, I. Etsion, D. B. Bogy는 DMT 모델을 확장(CEB 모델⁷⁾)하였다. 또한 Kogut와 Etsion은 JKR 모델을 기초로 미세 입자와 접촉하는 평면 간의 탄성 변형, 소성 변형을 고려한 모델을 발표하였다⁸⁾. 본 논문에서는 CEB 모델을 기초로 거칠기 돌기가 입자의 하중을 받음에 따라 높이가 변형되는 상호작용을 고려하여 CEB 모델과 비교하여 시뮬레이션 하였고, AFM을 이용해 시편의 표면형상 관련 데이터를 측정하였다. 또한 팁과 시편 사이의 분리력(Pull-off force)을 측정하여, 형상관련 데이터를 이용해서 계산된 값과 비교하여 상호작용을 고려한 경우의 유효성을 입증하였다.

2. 응착 특성

2.1 DMT 모델

DMT 모델은 접촉 면적 외부 주변의 넓은 범위의 인력(attraction)을 고려하였지만, 팁과 샘플 사이의 기하학적인 문제들을 Hertz 이론에 한정하였다. 이 이론에 관한 식은 다음과 같다.

$$P = \frac{Ka^3}{R} - 2\pi R\Delta\gamma \quad (1)$$

식 (1)을 다르게 표현하면, DMT 모델은 표면력 때문에 생기는 오프셋을 갖는 Hertz 모델이라고 할 수 있다. 접촉반지름 $a=0$ 일 때, P 의 값, 즉 분리력은 응착일 $\Delta\gamma$ 로 표현되는 $-2\pi R\Delta\gamma$ 을 갖는다³⁾.

2.2 돌기 상호간의 작용을 고려한 모델(CBT 모델)

보통 일반적인 돌기를 가진 거친 평면의 접촉에는 GW 이론을 사용한다. 이 모델에서는, 2개의 거친 표면의 접점은 거칠음과 단단한 매끄러운 표면과 거칠게 변형할 수 있는 표면 사이에 접촉에 의하여 나타난다. GW 모델은 매끄러운 평면과 접촉하는 표면이 모두 같은 곡률 반경 R 을 가진 거칠기들로 되어있는 것으로

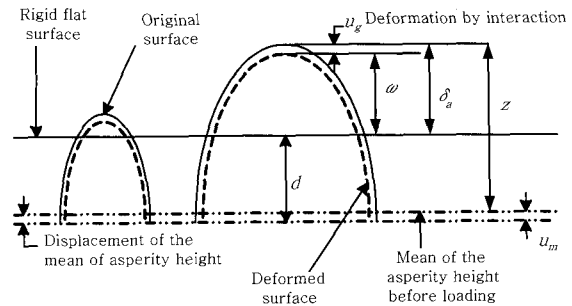


Fig. 1 Contact of a rough surface with a rigid smooth flat plane

가정하며, 거칠기의 정점 높이 혹은 거칠기 최고점은 평균 정점 평면에 불규칙하게 퍼져 있고 그것들은 표준 편차 σ 를 가진 Gaussian 분포로 되어 있다고 가정한다. GW 모델을 기초로 거칠기 돌기의 상호작용을 고려한 단단한 평면과 접촉에 거친 표면의 개략도를 Fig. 1에서 나타내었다.

u_m 은 거칠기 높이의 평균 값의 변위를 나타내며, z 는 하중으로 인해 변하기 전의 거칠기 높이의 평균 값으로부터 측정된 선택된 임의의 거칠기의 높이이고, δ_a 는 매끈한 평면의 접촉으로 인해 거칠기가 눌리는 간섭으로 인한 간섭량이다. 거칠기의 상호작용을 고려하여, δ_a 를 그림을 참고하여 구하면 다음과 같다.

$$\delta_a = \omega + u_g \quad (2)$$

여기서 Fig. 1을 고려하여 ω 에 관한 관계식을 구해보면 다음과 같다.

$$\omega = z - d + (u_m - u_g) \quad (3)$$

여기서 d 는 평편한 평면과 거친 평면간의 평균 떨어진 거리이고, $(u_m - u_g)$ 는 거칠기의 상호작용으로 인해 발생하는 값이므로 상호작용을 고려하지 않을 경우 0이 된다. 식 (3)을 한 개의 거칠기에 작용하는 접촉 하중과 표면에 대한 전체 평균 접촉압력을 이용하여 ω 를 다시 표현하였다^{9,10)}.

$$\omega = z - d + 1.12 \frac{\sqrt{\omega_a P_a}}{E} \quad (4)$$

여기서 ω_a 는 하나의 돌기에 대한 접촉 하중이고, P_a 는 표면 전체에 대한 평균 접촉 압력이다. 이 식에서의 마지막 항은 상호 작용으로 인해 추가된 항으로,

이 식을 통해 거칠기의 상호 작용은 접촉 하중이 커질수록 커지고, 재료의 강도가 클수록 작아질 것임을 유추해 볼 수 있다.

2.3 탄성과 소성을 고려한 모델링

탄성 변형된 돌기에 가해지는 하중 w_e 는 다음과 같다¹¹⁾.

$$w_e = KR^{1/2} \varpi^{3/2} \tag{5}$$

이 식을 (4) 식에 대입해 보면, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\omega = z - d + \frac{1.12}{E} \sqrt{KR^{1/2} \varpi^{3/2}} \tag{6}$$

탄성 변형된 돌기에 가해지는 하중 w_p 는 소성 변형 동안의 돌기의 부피 보존에서 얻어지고 그 식은 다음과 같다¹²⁾.

$$w_p = \pi R k H (2\varpi - \varpi_c) \tag{7}$$

여기서 k 는 경도에 대한 최대 접촉 압력 비를 나타내고, ϖ_c 는 소성변형이 일어나는 시점에서의 경계상수이다. Tabor¹³⁾에 따르면 k 는 0.6 이란 값을 얻을 수 있고, ϖ_c 는 다음과 같이 나타난다.

$$\varpi_c = \left(\frac{\pi k H}{2E}\right)^2 R \tag{8}$$

여기서 $\varpi < \varpi_c$ 이면 탄성 접촉을 의미하는 것이고, $\varpi \geq \varpi_c$ 이면 소성 접촉을 의미한다. 소성변형일 때의 하중 w_p 를 (4)식에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\omega = z - d + \frac{1.12}{E} \sqrt{KR k H (2\varpi - \varpi_c) P_a} \tag{9}$$

따라서 표면 전체에 대한 평균 접촉 압력 P_a 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

여기서 $\Phi(z)$ 는 돌기 높이의 평균 분산, N 은 단위 면적 당 돌기의 개수를 나타낸다.

$$P_a = N \left[KR^{1/2} \int_d^{d+\varpi_c} (z-d)^{3/2} \Phi(z) dz + \pi R k H \times \int_{d+\varpi_c}^{\infty} \{2(z-d) - \varpi_c\} \Phi(z) dz \right] \tag{10}$$

일반적으로 접촉모델에 있어서 탄성, 소성 접촉을 표현할 때 소성지수($\Psi = (E/H) \sqrt{\sigma/r}$)를 사용한다. 보기를 들면 $\Psi < 0.6$ 이면 완전 탄성 접촉을 나타내는 것이고, $\Psi > 1.0$ 이면 완전 소성 접촉을 나타낸다. 따라서, 식(10)을 소성지수 Ψ 를 사용하여 무차원화시키면 식(11)과 같이 표현되며, $\bar{P}_a = (P_a \sqrt{2\pi} / KN R^{1/2} \sigma^{3/2})$, $\varpi^* = \varpi/\sigma$, $\varpi_c^* = \varpi_c/\sigma$, $z^* = z/\sigma$ 이다.

$$\bar{P}_a = \int_{\varpi_c^*}^{\varpi^*} \varpi^{1/2} e^{-(z^*)^2/2} dz^* + \frac{1.413}{\Psi} \int_{\varpi_c^*}^{\infty} (2\varpi^* - \varpi_c^*) e^{-(z^*)^2/2} dz^* \tag{11}$$

여기서 ϖ_0^* 와 ϖ_c^* 는 상호작용을 고려한 ϖ_0^* , ϖ_c^* 에 부합하는 변위이고, ϖ_c^* 는 돌기의 상호작용 효과를 고려하였다.

무차원화 시킨 변수를 사용하여 식 (4)와 (6)도 다음과 같이 표현된다.

$$\varpi^* = z^* - d^* + 0.94 \sqrt{P_a \beta \varpi^{*3/2}} \tag{12}$$

$$\varpi^* = z^* - d^* + 0.94 \sqrt{P_a \beta \left(\frac{1.413}{\Psi}\right) (2\varpi^* - \varpi_c^*)} \tag{13}$$

여기서 $d^* = d/\sigma$ 이고, $\beta = NR\sigma$ 이다.

이 경우 β 는 0.04로 계산된다. 식 (16)에서 첫 번째 적분은 돌기의 탄성변형에 관계된 항이고, 두 번째 적분은 단위 면적당 총 접촉면적에 대한 소성변형에 관계된 항임을 알 수 있다.

식 (11)에서 사용된 ϖ_0^* , ϖ_c^* 은 식 (17)에서 $z^* = d^*$ 을, $z^* = d^* + \varpi^*$ 으로 치환함으로써 얻어질 수 있고, z^* 은 돌기의 상호작용에 영향을 미치는 변수임을 알 수 있다. 또한 z^* 은 식 (12), (13)을 이용하여 ϖ^* 에 관한 항으로 나타낼 수도 있는데 이는 탄성, 소성적으로 돌기에 가해지는 하중과도 관계가 있다. 따라서 무차원화 시킨 접촉 하중 \bar{P}_a 는 무차원 변수 d^* , Ψ 를 이용하여 계산될 수 있다.

접촉하는 거칠기 돌기와 접촉하지 않은 거칠기 돌기를 고려한 금속표면의 응착력은 F_s 로 표현되며⁷⁾, 이를 Fuller와 Tabor에 의해 정의된 탄성응착지수 $\theta (= K\alpha^{3/2} r^{1/2} / r\Delta\gamma)$ 를 이용해 무차원화 할 수 있다.

최종적으로, 무차원화된 외부 하중 \bar{P} 는 최종적으로 다음과 같이 얻어진다.

$$\bar{P} = \bar{P}_a - \bar{F}_s \tag{14}$$

거칠기 돌기의 탄성변형 영역($\Psi = 0.5$)내에서의 무차원화된 평균간격에 의해 표현되는 무차원화된 외부 하중과 탄성응착지수에 따른 분리력의 그래프를 Fig. 2의 (a)~(c)와 (d)와 같이 시뮬레이션 하였다.

Fig. 2의 (a)와 같이 $\theta = 16$ 일 때는 접촉면에 넓게 탄성적으로 응착이 일어나는 것을 의미하고, 무차원화된 평균 간격이 작아질수록 하중은 음의 방향으로 가는데 이는 응착력이 크다는 것을 의미한다. 반대로 (b)와 (c)의 경우 무차원 하중은 양의 값을 갖는데 이는 응착력이 작다는 것을 의미한다. 그리고 상호작용을 고려했을 경우의 하중의 값이 더 큰 값을 갖는다. (d)의 경우와 같이 분리력을 탄성응착지수에 대해 시뮬레이션을 했을 경우, 분리힘은 또한 거칠기 돌기의 상호작용이 존재할 때 훨씬 감소함을 볼 수 있다.

3. AFM을 이용한 응착력의 계측

응착력을 계측하기 위해 알루미늄 시편을 사용하였으며 거칠기 높이의 표준편차나 거칠기 분포 밀도 등을

추가로 계측하였다. 사용된 시편의 경우, 시편은 실험 전에 에탄올로 세척 후 질소 가스로 잔여 오염물질을 제거한 후 사용하였으며, 실험 시 주변의 환경 조건의 영향은 배제한 것이고, 또한 습도가 높을 경우, 수분의 영향으로 표면 형상 데이터를 읽고 분리힘을 측정하는데 오차가 발생할 수 있으므로, 상대습도 27~33 %와 20~23°C의 조건에서 실험하였다.

3.1 Si-웨이퍼의 표면형상 관련 데이터

AFM 팁의 마모를 고려하여 표면형상 데이터를 읽는 팁과 분리력 측정 팁을 다르게 사용했는데, 팁에 관한 기본적인 물성치는 표면형상 계측용은 탄성계수 1.8N/m, 곡률반경 10 nm 이며, 분리력 측정팁의 경우에는 탄성계수 0.1N/m, 곡률반경 10 nm이다. 또한 팁의 재질은 Si이다.

표면 형상관련 데이터를 얻기 위한 Si 웨이퍼 시편을 2개 사용했으며 시편의 스캐닝 사이즈는 $5\mu m \times 5\mu m$ 이다. 거칠기 높이에 대한 r.m.s. 값은 캔티레버 팁으로 스캔하는 영역에 따라 AFM에서 자동으로 산출된다.

Fig. 4와 5에서와 같이 웨이퍼 시편에 팁을 압입하여 간접적으로 웨이퍼 시편의 경도 값과 탄성계수 값을

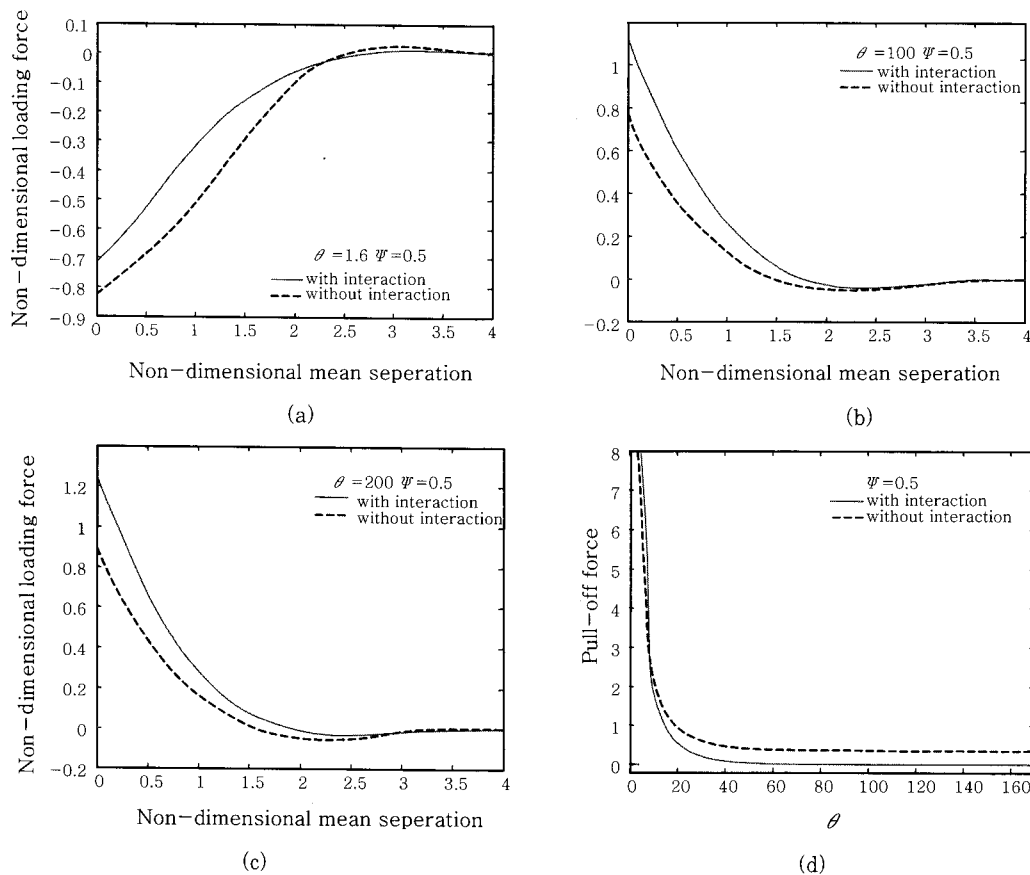


Fig. 2 Loading force against mean separation and Pull-off force as function of θ

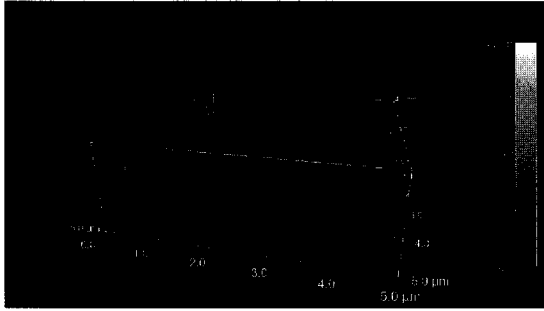


Fig. 3 3-D image of surface roughness of Si-wafer sample

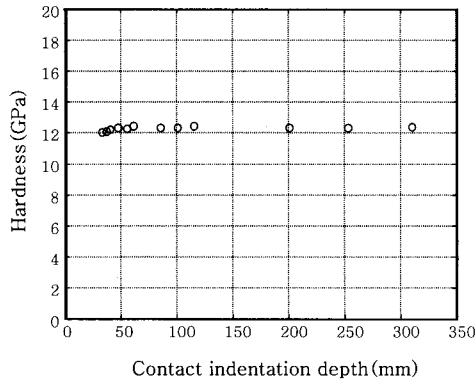


Fig. 4 Hardness of Si-wafer obtained using nano-indentation technique

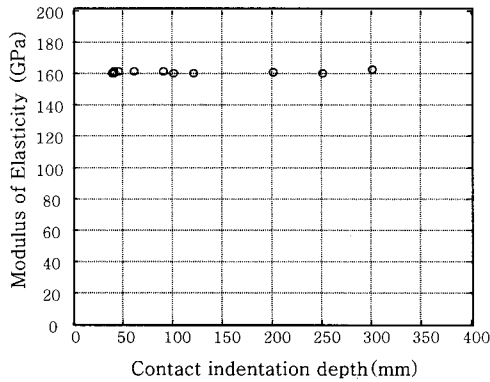


Fig. 5 Young's Modulus of Si-wafer obtained using nano-indentation technique

측정하여 경도는 대략 12.5 GPa, 탄성계수는 160 GPa가 됨을 구했다.

3.2 Si-wafer 시편과 AFM 팁 사이의 분리력 측정

분리힘 측정을 하기 위해서 알루미늄 시편 면적 3곳을 임의로 설정하여 각각 5μm 간격으로 20 군데를 측정된 결과를 종합 평균하여 사용하였다.

Fig. 6은 각 시편과 팁의 분리힘을 도출하기 위해 출

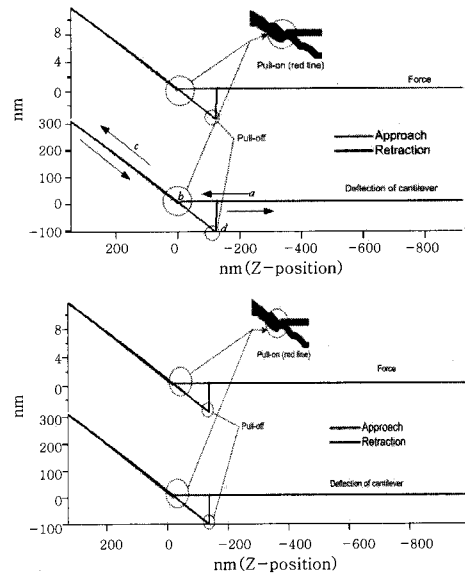


Fig. 6 Graph for pull-off force between wafer samples and tip

력된 그래프를 각각의 샘플 별로 하나씩 보여준다. 과정은 Fig. 6에 화살표로 표현된 바와 같다. 처음에 팁이 표면에 가까워진다(a 단계). 처짐이 생기기 시작하는 부분에서 굴곡이 발생한 것은 팁과 시편 사이에 인력이 감지되는 것을 나타내며(b 점), 이 굴곡지점 임계 값에 이르러서 팁이 시편에 닿아 있음을 의미한다. 팁이 시편에 접촉 후에 표면에 분리가 된 후에도 응착력이 존재하기 때문에, 팁은 임계 처짐 값에 도달할 때 까지 붙어 있는 상태로 존재한다. 이 임계 처짐이 분리 점과 관련이 있다. 이론적으로는 분리힘은 임계 처짐 값에 캔티레버의 탄성 계수를 곱하면 구할 수 있다. Fig. 6에서 측정된 분리 점에서의 평균적인 힘, 임계 처짐 및 이론적 분리력 식을 이용한 응착일의 값은 Table 1과 같다.

Table 1과 Table 2의 값들을 이용하여 구한 Si-웨이퍼의 탄성응착지수와 소성응착지수는 Table 3과 같다.

Table 1 Surface roughness parameter of Si-wafers

	sample 1	sample 2
r.m.s.	692.38 μm	710.07 μm
Curvature radius of asperity(r)	0.547 μm	0.754 μm
Standard deviation of asperity's height(σ)	2.54 nm	2.75 nm
hardness	12.5 GPa	
Young's Modulus	160 GPa	
N (μm ²)	30.57	33.64

Table 2 Values of critical deflection and pull-off force $\Delta\gamma$ between tip and Si-wafer

	sample 1	sample 2
Maximum deflection	97.07 nm	101.03 nm
Pull-off force	3.67 nN	3.81 nN
$\Delta\gamma$	0.584 N/m	0.606 N/m

Table 3 Values of each adhesion index

	sample 1	sample 2
θ	33.2209	35.127
Ψ	0.872	0.7730

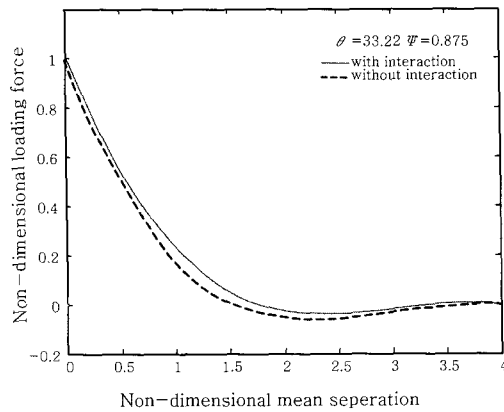


Fig. 7 Loading force against mean separation at $\Psi = 0.872$

산출된 소성응착지수는 모두 0.6보다 크고 1.0보다 작으므로 거칠기 돌기의 변형거동은 탄성 변형과 소성 변형이 모두 존재함을 알 수 있다. 첫 번째 샘플에 대한 시뮬레이션은 Fig. 7과 같다.

Fig. 2의 거칠기 돌기의 탄성변형 영역에서는 무차원화된 평균 간격에 따른 작용하중이 거칠기 돌기의 상호작용을 고려했을 경우와 그렇지 않은 경우가 차이가 많이 발생하는 것을 볼 수 있으나, 탄성 변형과 소성 변형이 동시에 일어나는 경우 크게 차이가 없다. 즉 탄성 혹은 소성 변형이 아닌 동시에 변형이 일어나는 경우는 상호작용의 영향이 상대적으로 적음을 알 수 있다.

3.2절에서 측정된 분리력과 실험을 통해 얻어진 각종 값들을 이용하여 계산된 분리력들을 Fig. 8과 같이 표시하였다. 계산 결과 거칠기 돌기의 상호작용을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우보다 훨씬 실제 측정 값에 가까움을 볼 수 있다. 그러므로 미세 입자의 분리력을 고려해야 할 각종 메커니즘에 있어서 응착 표면의 거칠기 돌기의 상호작용의 영향이 중요함을 알 수 있다.

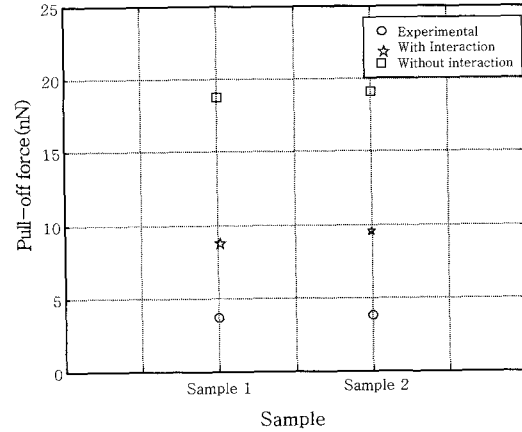


Fig. 8 Numerical values (with and without interaction) and experimental value of pull-off force

4. 결 론

AFM으로 실제로 시편의 거칠기 형상 관련 데이터와 분리힘을 얻었으며, 이를 토대로 거칠기 돌기의 상호작용을 고려한 응착모델에 적용하였다. 그 결과로 거칠기 돌기의 상호작용의 영향을 고려했을 때가 실제 측정된 분리힘에 훨씬 가깝게 계산되었음을 확인하였다. 그러므로 응착 특성 규명에 있어서 거칠기 돌기의 상호작용의 영향이 고려되어야 할 중요한 인자가 될 수 있을 것이다. 그렇지만 제시된 모델이 거칠기 돌기의 높이가 Gaussian 분포를 가지고 있으며, 돌기의 형상이 동일한 곡률반경을 갖는 것으로 단순하게 가정되는 것이므로 상당히 제한적일 수 있다. 추후에는 형상에 대한 비대칭성과 침도의 영향이 추가가 되어야 할 것이며, 거칠기 높이 분포가 non-Gaussian인 모델도 다양하게 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. K. L. Johnson, Contact mechanics, Cambridge University Press, 1999
2. B. V. Derjaguin, V. M. Muller and Yu. P. Toporov, "Effect of contact deformations on the adhesion of particles", Journal of Colloid and Interface Science, **53-2**, 314-326, 1975
3. K. L. Johnson, K. Kendall and A. D. Roberts, "Surface energy and the contact of elastic solids", Proc. R. Soc. Lond. A., 301-314, 1971
4. D. Maugis, "Adhesion of sphere: The JKR-DMT Transition Using a Dugdale Model", Journal of Colloid and Interface Science, **150-1**, 243-269, 1992
5. J. A. Greenwood, J. B. Williamson, "Contact of nominally flat surfaces", Proc. R. Soc., London, A295, 300~319, 1966
6. B. Bhushan, Handbook of Micro/Nano Tribology,

- CRC Press, 1999.
7. W. R. Chang, I. Etsion, D. B. Bogy, "An elastic and plastic model for contact of rough surface", *J. of Tribology*, **109**, 257-263, 1987
 8. L. Kogut, I. Etsion. "Adhesion in elastic - plastic spherical micro contact", *J. of Colloid and Interface science*, **261-2**, 372-378, 2003
 9. Zhao, Y. and L. Chang. "A Model of Asperity Interactions in Elastic-Plastic Contact of Rough Surfaces.", **123-4**, 857-864., 2001
 10. Love, A. E. H., "The stress produced in a semi-infinite solid by pressure on part of the boundary". *Phil. Trans. Royal Society*, **228**, 377-420, 1929
 11. D. Maugis, "Contact, Adhesion and Repture of Elastic Solids, Springer, 1999
 12. W. R. Chang, I. Etsion, D. B. Bogy, "An elastic and plastic model for contact of rough surface", *J. of Tribology*, **109**, 257-263, 1987
 13. D. Tabor, "The hardness of Metals" Oxford University Press, 1951