

논문 2007-44IE-3-6

# 응착이론을 이용한 마이크로/나노스케일 접촉에서의 응착특성 규명 및 개선에 관한 연구

( A Study on identification and improvement of adhesive quality using  
adhesive theory at micro/nano scale contact )

김 규 성\*, 윤 준 호\*\*

( Gyu-Sung Kim and Jun-Ho Yoon )

## 요 약

거칠기를 고려한 응착모델들에 있어서 탄성 응착 지수와 소성 응착 지수가 중요한 매개변수이며, 본 논문에서는 매개 변수를 변화시켜 무차원화 된 하중과 분리힘의 특성을 시뮬레이션 하고 분석하였다. AFM을 이용하여 실험 샘플의 표면 거칠기 관련 특성 값들을 얻었으며, 이를 이용하여 상호작용을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 분리힘을 계산하였다. 계산된 분리힘들을 팁과 샘플 표면 사이의 측정된 분리힘과 비교하였고, 이를 통하여 표면 거칠기 돌기의 상호작용으로 인한 변형이 응착 특성에 중요한 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었다.

## 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.

**Keywords :** JKR 모델, 상호작용(interaction), 탄성응착지수, 소성응착지수, AFM

## I. 서 론

최근 미세가공 기술에 힘입어 태동된 마이크로/나노 기은 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 부품들

이 작동 중 미소 표면력에 의하여 접촉된 두 표면간의 응착력이 기계요소의 구동력보다 큰 경우, 미소 기계요소를 고착 시킬 뿐만 아니라 미소 표면파손의 원인으로 작용하기 때문에 응착현상의 규명과 이에 따른 응착력 측정에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다<sup>[1]</sup>.

여러 연구자에 의해서 이러한 미세한 표면간의 상호작용력에 관하여 최근 많이 연구되고 있으며, 특히 Bhushan, Maboudian, Kmovpoulos<sup>[2]</sup>들에 의해 마이크로/나노 시스템 적용을 위한 미소 응착력의 연구 동향에 대하여 총괄적으로 정리되어 발표된 바가 있다. 이러한 분야의 연구는 과거에도 많은 관심을 가지고 연구자들에 의해 연구되었으며 Tabor과Israelachvili는 반데르 발스 힘을 측정하였고<sup>[3]</sup>, Skinner 및 Gane<sup>[4]</sup>은 미소

\* 정회원, 서일대학 자동차과  
(Department of Automobile, Seoil College)

\*\* 정회원, 여주대학 자동차과  
(Department of Automobile., Yeoo Institute of Technology)

※ 본 논문은 2006년도 서일대학 학술연구비에 의해 연구되었음

접수일자: 2007년4월20일, 수정완료일: 2007년9월4일

수직력 조건 하에서 표면 사이의 연속적인 마찰력을 측정하였다.

이러한 기본적인 응착 접촉 이론들은 Hertz의 접촉 이론<sup>[5]</sup>에서 출발한다. Hertz는 접촉하중과 접촉반지름, 탄성계수, 접촉하는 구의 반지름과의 관계를 정의했다. 물론 응착력 항은 존재하지 않는다. 이를 기본으로 하여 Derjaguin, Muller, Toporov<sup>[6]</sup>과 Johnson, Kendall, Roberts<sup>[7]</sup>는 각각 DMT, JKR 모델을 발표하였다. 이 두 이론들은 기본적으로 헤르츠 이론을 기반으로 하지만 각각 응착력이 발생하는 영역을 각각 접촉 영역 외부와 내부로 다르게 정의되었다. 또한 Maugis<sup>[8]</sup>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. 실제 모든 접촉 표면은 완전 매끈한 형태가 아닌 거칠기가 존재하는 표면이다. 실제의 접촉은 이들 거칠기 돌기와 돌기의 접촉으로 가정할 수 있으므로 이들 거칠기에 대한 추가적인 고려가 응착력의 해석에 반드시 필요하다.

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 GW 모델<sup>[9]</sup>을 기초로 시작되었다. GW모델은 가장 먼저 거칠기의 형상, 거칠기의 밀도, 거칠기 높이의 평균 값을 등을 가정하였다. 이를 기초로 Roy Chowdhury, Ghjosh는 JKR 모델을 확장한 모델(RG 모델)을 발표 하였으며<sup>[10]</sup>, W.R.Chang, I. Etsion, D.B. Bogy는 DMT 모델을 확장(CEB 모델)하였다<sup>[11]</sup>. 또한 Kogut와 Etsion<sup>[12]</sup>은 JKR 모델을 기초로 미세 입자와 접촉하는 평면 간의 탄성 변형, 소성 변형을 고려한 모델을 발표하였다. 본 논문에서는 RG 모델<sup>[14]</sup>을 기초로 거칠기 돌기가 입자의 하중을 받음에 따라 높이가 변형되는 상호작용을 고려하여 RG 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.

## II. 표면 거칠기를 고려한 기본 응착모델

### 1. RG 모델

응착 모델 중 응착 표면의 거칠기를 고려한 RG 모델은 JKR 모델의 특징을 기본으로 하며 거칠기 높이 분포는 Gaussian 분포를 기초로 한다. JKR 모델과 Gaussian 분포에 관한 내용은 다음과 같다.

#### 가. JKR 모델

JKR 모델에서는, 두 개의 표면이 접촉하지 않은 상태에서는 어떠한 힘이 없고, 접촉 상태에서는 접촉 면적 내부에서 작은 범위의 인력이 작용한다고 가정한다. 그리고 팁-샘플 사이의 기하학적인 내용들이 헤르츠의 이론에 제한되지 않는다. 이 가정들은 작은 강성을 갖고 큰 곡률 반경을 갖는 응착력이 큰 시스템에서는 잘 적용된다. 하중을 제거하는 동안 팁과 샘플 사이에 목(neck)이 형성되고, 음(-) 하중이 될 때 연결 목은 파열된다. 이것이 응착력 히스테리시스의 원인이 된다<sup>[5][13]</sup>.

$$P = \frac{Ka^3}{R} - \sqrt{6\pi\Delta\gamma Ka^3} \quad (1)$$

$$P_{pull-off} = 2\pi\Delta\gamma R \quad (2)$$

$$a_{JKR}^3 = \frac{R}{K} \left\{ P + 3\pi\Delta\gamma R + [6\pi\Delta\gamma R P + (3\pi\Delta\gamma R)^2]^{1/2} \right\} \quad (3)$$

여기서,  $P$ 는 작용하중,  $\Delta\gamma$ 는 응착일,  $a$ 는 접촉반지름,  $R$ 은 접촉하는 입자의 반지름,  $K$ 는 접촉하는 두 물체의 탄성계수를 아래와 같이 계산하여 등가로 구한다.

$$K = \frac{4}{3} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (4)$$

#### 나. 거칠기 돌기 높이의 Gaussian 분포

거칠기의 정점 높이 혹은 거칠기 최고점은 Fig. 1.과 같이 평균 정점 평면에 불규칙하게 퍼져 있고 그것들은 표준 편차  $\sigma$ 를 가진 Gaussian 분포로 되어 있다고 가정하며, Fig. 2.에서와 같이 거칠기 돌기의 정점은 원에 가깝다고 가정한다<sup>[9]</sup>.

Gaussian 분포를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\phi(z) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} e^{-z^2/2\sigma^2} \quad (5)$$

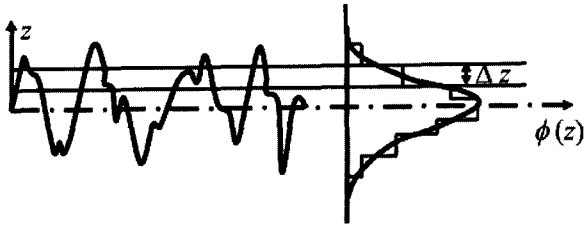


그림 1. 주어진 표면 거칠기에 대한 확률밀도함수  
Fig. 1. Generation of probability density function for a given surface roughness.

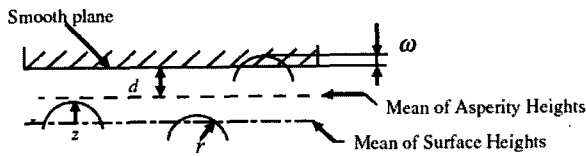


그림 2. 접촉하는 거친 표면 모델  
Fig. 2. Contacting rough surface model.

표면 거칠기를 고려한 응착모델인 RG 모델은 JKR 모델의 고유 특성을 기반으로 하기 때문에 응착 특성이 응착표면에 하중이 가해질 때와 제거될 때의 두 가지로 나뉜다. RG 모델에서의 두 가지 경우의 최종 하중에 관한 식은 다음과 같다.

### (1) 하중이 가해질 때의 응착 관련 식

하중이 가해질 때는 거칠기 돌기의 탄성변형과 소성 변형 모두를 고려하며, 단위 면적당 모든 거칠기 돌기에 대해 적용된 전체 하중  $P_g$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$P_g = N \int_d^{d+\omega_{c1}} \left[ \frac{Ka^3}{r} - (6\pi\Delta\gamma Ka^3)^{1/2} \right] \phi(z) dz \quad (6)$$

$$+ N \int_{d+\omega_c}^{\infty} (\pi a_p^2 H - 2\pi r \Delta\gamma) \phi(Z) dz$$

여기서  $\omega_c$ 는 거칠기 돌기의 탄성변형과 소성변형 사이의 임계변위이며,  $\omega_{c1}$ 는 거칠기 돌기의 걸보가 변위이다. 식 (6)는 탄성응착지수와 소성응착지수를 이용해서 식 (8)과 같이 무차원시키는데 무차원 지수는 식 (7)와 같다.

$$\theta = K\sigma^{3/2} r^{1/2} / r\Delta\gamma \quad (7)$$

$$\psi = \pi^2 r H^4 \sigma / 18K^2 \Delta\gamma^2$$

탄성 응착지수는 Fuller과 Tabor에 의해 정의된 지수로서, 탄성 응착 지수는 반지름  $r$ 인 구가 깊이  $\sigma$ 로 등

가 탄성 계수  $E$ 인 탄성 고체에 밀리는 힘과 구에 의해 생기는 응착력의 비로 정의 된다. 마찬가지로 K.L. Johnson은 거칠기 돌기 높이의 지수 분포로 가정하여, 소성 변형에 대한 응착 지수를 정의하였다. JKR 접촉에 대한 두 지수의 한계 값은 각각 10과 0.125이다<sup>[14]</sup>. 이 값을 초과할 경우, 일반적으로 탄성 혹은 소성 변형에 의한 영향이 미미하다<sup>[14]</sup>.

탄성 접촉에 있어서 응착력은 무차원 매개변수인 탄성 응착 지수  $\theta$  값이 작을 때 크고<sup>[14][16]</sup>. 소성 접촉에 있어서는 무차원 매개변수인 소성 응착 지수  $\psi$ 가 0.125보다 클 때, 응착력이 작다<sup>[14~15]</sup>.

$$\bar{P}_g = \int_{\omega_b}^{\omega_{c1}} (\omega^{*3/2} - 4.34\omega^{*3/4}) e^{-(z^*)^2/2} dz^* \quad (8)$$

$$+ \int_{\omega_c}^{\infty} \left( 7.3 \frac{\psi^{1/4} \omega^*}{\theta^{1/2}} - \frac{6.28}{\theta} \right) e^{-(z^*)^2/2} dz^*$$

여기서,  $\bar{P}_g = P_g \sqrt{2\pi} / KNr^{1/2} \sigma^{3/2}$ ,  $\omega^* = \omega / \sigma$ ,  $z^* = z / \sigma$ 이다.

### (2) 하중이 제거될 때의 응착 관련 식

하중이 제거되어 분리될 때는 거칠기 돌기의 변형은 연성 분리조건과 취성 분리조건을 동시에 고려한다. 무차원화된 단위 면적당 제거하중은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{P}_u = - \int_0^1 7.3 \frac{\psi^{1/4}}{\theta^{1/2}} \omega^* e^{-(z^*)^2/2} dz^* + \int_{1/\psi-\omega_b}^{\omega_{c1}} \frac{4.71}{\theta} F\left(\frac{\omega^*}{\omega_b}\right) e^{-(z^*)^2/2} dz^* \quad (9)$$

$$- \omega_c^* \int_L^{\infty} 2.12(\omega^*)^{1/2} e^{-(z^*)^2/2} dz^*$$

여기서,  $\omega_c$ 는 분리가 되는 동안 거칠기 돌기의 탄성 변위이고,  $\bar{P}_u = P_u \sqrt{2\pi} / KNr^{1/2} \sigma^{3/2}$ 이다.

### 2. 거칠기 돌기의 상호작용을 고려한 모델

$u_m$ 은 거칠기 돌기 높이의 평균값의 변위를 나타내며,  $z$ 는 하중으로 인해 변하기 전의 거칠기 높이의 평균값으로부터 측정된 선택된 임의의 거칠기 돌기의 높이이고,  $\delta_a$ 는 매끈한 평면의 접촉으로 인해 거칠기 돌기가 눌리는 간섭으로 인한 간섭량이다. 거칠기 돌기의 상호작용을 고려하여,  $\delta_a$ 를 그림을 참고하여 구하면 다

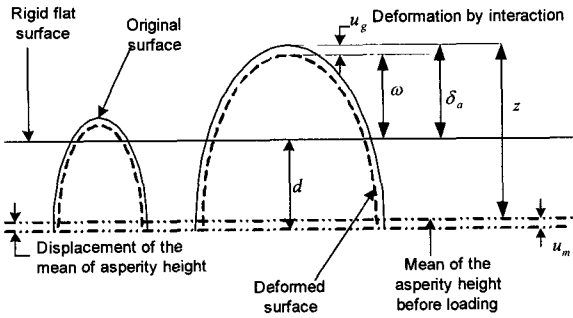


그림 3. 상호작용을 고려한 강성 평면과 거친 표면의 접촉  
Fig. 3. Contact of a rough surface with a rigid flat plane considering interaction.

음과 같다.

$$\delta_a = \omega + u_g \quad (10)$$

그리고 Fig. 3을 참고하면  $\omega$ 에 관한 식은 다음과 같이 변한다.

$$\omega = z - d + (u_m - u_g) \quad (11)$$

여기서  $u_m - u_g$ 는 거칠기 돌기의 상호작용으로 인해 발생하는 값이므로 상호작용을 고려하지 않을 경우 0이 된다. 식 (8)을 한 개의 거칠기에 작용하는 접촉 하중 ( $P_s$ )과 표면에 대한 전체 평균 접촉 압력 ( $P_g$ )을 이용하여 변형하면,

$$\omega = z - d + 1.12 \frac{\sqrt{P_s \cdot P_g}}{E} \quad (12)$$

가 된다. 이 식에서의 마지막 항은 상호 작용으로 인해 추가된 항으로, 이 식을 통해 거칠기의 상호 작용은 접촉 하중이 커질수록 커지고, 재료의 강도가 클수록 작아질 것일 것임을 유추해 볼 수 있다.

하중이 가해질 때 거칠기 돌기의 탄성 변형과 소성 변형에 관한 식을 식 (12)를 이용하고 응착 지수로 무차원화 하면,

$$\omega^* = z^* - d^* + 0.94 \sqrt{\bar{P}_g \omega} \left[ (\omega^*)^{3/2} - \frac{4.34}{\theta^{1/2}} (\omega^*)^{3/4} \right] \quad (13)$$

$$\omega^* = z^* - d^* + 0.94 \sqrt{\bar{P}_g \omega} \left[ 7.3 \frac{\psi^{1/4}}{\theta^{1/2}} \omega^* - \frac{6.28}{\theta} \right] \quad (14)$$

여기서  $\omega = Nr\sigma$ 이며,  $N$ 은 단위 면적당( $\mu\text{m}^2$ )이다.

식 (13)과 (14)를 이용해 식 (6)을 다시 표현하면,

$$\begin{aligned} \bar{P}_g &= \int_{\bar{\omega}_0^*}^{\bar{\omega}_1^*} (\omega^{*3/2} - 4.34 \omega^{*3/4}) e^{-(z^*)^2/2} dz^* \\ &+ \int_{\bar{\omega}_c^*}^{\infty} \left( 7.3 \frac{\psi^{1/4}}{\theta^{1/2}} \omega^* - \frac{6.28}{\theta} \right) e^{-(z^*)^2/2} dz^* \end{aligned} \quad (15)$$

가 되며, 하중이 제거될 때 식 (11)은 다음과 같이 바뀐다.

$$\omega^* = z^* - d^* - 1.373 \sqrt{\bar{P}_u \omega^{*1/2} / \omega_c^*} \quad (16)$$

식 (16)을 이용해 식 (9)를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{P}_u &= - \int_{\bar{\omega}_0^*}^{\bar{\omega}_1^*} 7.3 \frac{\psi^{1/4}}{\theta^{1/2}} \omega^* e^{-(z^*)^2/2} dz^* + \int_{\bar{\omega}_c^*}^{\bar{\omega}_1^*} \frac{4.71}{\theta} F \left( \frac{\omega^*}{\omega_b^*} \right) e^{-(z^*)^2/2} dz^* \\ &- \omega_c^* \int_{\bar{\omega}_c^*}^{\infty} 2.12 (\omega^*)^{1/2} e^{-(z^*)^2/2} dz^* \end{aligned} \quad (17)$$

### III. 응착모델의 시뮬레이션

$\theta$ ,  $\psi$ 의 조합과 무차원화된 평균 간격  $d^*$ 를 변화시켜 반복적으로 작용하중과 제거하중을 상호작용을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우를 각각 계산하여 그래프로 변화시켰다. 상호작용을 고려할 때와 하지 않을 때 사이의 하중에서의 차이는  $\psi$ 가 크고 평균 거리가 작을수록 더 커진다는 것을 알 수 있다. 그래서 거칠기 돌기의 상호작용의 영향은 상호작용이 응착력의 영향을 감소시킨다는 것을 의미하는 큰  $\psi$  값을 가질 때 더 강력하다.

일반적으로 응착 하중에서의 상호작용의 영향은  $\theta$ 와  $\psi$ 의 영향에 관계없이 특히 표면의 접촉 하중을 증가시키며, 이것은 거칠기 돌기의 상호작용이 거친 표면들 사이에서의 응착을 감소시킨다는 것을 의미한다.

거칠기 상호 작용으로 많은 수의 압착 하중을 받는 거칠기 돌기들은 늘어날 것이고 이것은 큰 음의 평균 간격에서의 상호작용이 작용하지 않는 경우와 비교하여 거칠기 돌기의 상호작용이 고려되는 경우에서 제거 하중의 감소에 대한 이유가 될 수 있을 것이다. 상호작용의 영향에 의하여 접촉을 하지 않았던 새로운 거칠기 돌기들이 강제로 접촉이 됨에 따라, 접촉 면적은 거의 Fig. 5에서 수평에 가까운 부분에서는 같은 결과를 얻게 될 것이다.

이 결과들로부터 유도된, 두 면을 분리하는데 필요한

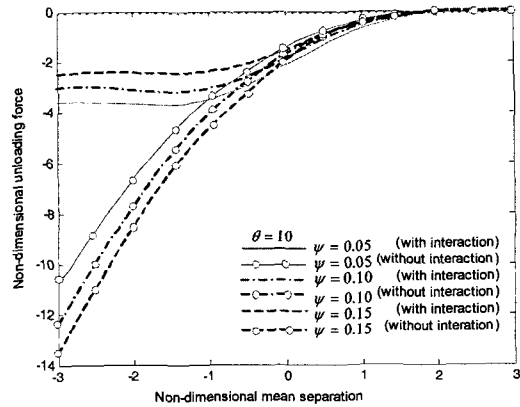
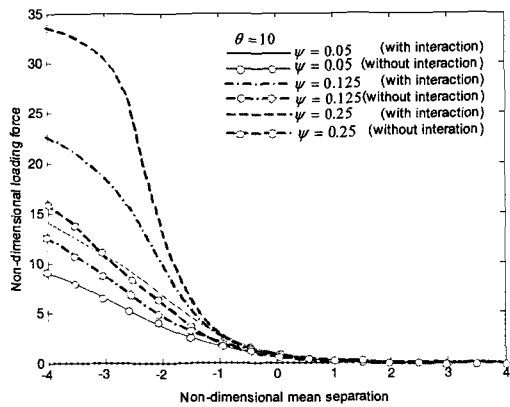
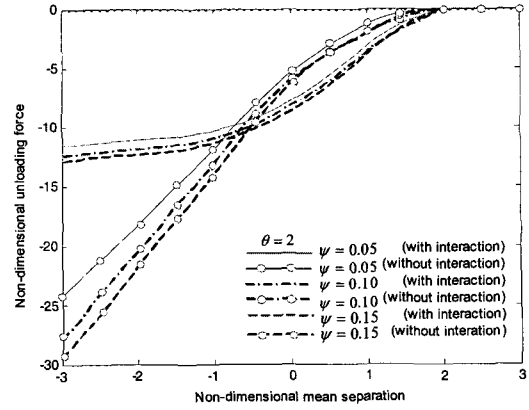
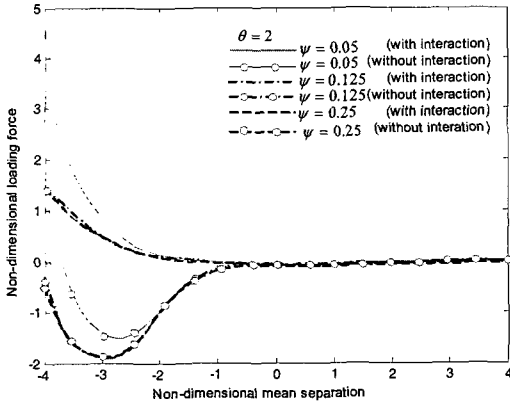


그림 4.  $\theta$ 와  $\psi$ 를 변화시켰을 때의 평균분리간격에 대한 가해진 하중의 변화

Fig. 4. Loading force against mean separation for varying  $\theta$  and varying  $\psi$ .

그림 5.  $\theta$ 와  $\psi$ 를 변화시켰을 때의 평균분리간격에 대한 제거 하중의 변화

Fig. 5. Unloading force against mean separation for varying  $\theta$  and varying  $\psi$ .

최대 음의 값을 갖는 힘, 즉 분리힘은 Fig. 6. 에서와 같이, 상호작용이 있는 경우와 없는 경우를 고려하고 두 개의 다른  $\psi$  값을 고려하여  $\theta$  값에 대하여 산출하였다. 분리힘의 기울기에 있어서의 변화는 그래프에서와 같이  $\theta$ 값이 커짐에 따라 무시가 되는데,  $\theta$ 의 기울기가 수평이 되는 부분은 상호작용을 고려한 두 가지 경우에서,  $\psi$ 의 영향에 상관 없는 작은 응착력을 가지게 된다.  $\theta$ 의 임계 값은 상호작용이 고려되는 경우에서 조차도 거의 같다. 그러나 분리힘의 크기에 있어서는 상당한 차이가 있다.  $\theta = 2$ ,  $\psi = 0.05$ 인 부분에서의 값은 거의 3배 정도까지 차이가 난다. 이것은 거칠기의 상호작용이 거친 표면이 접촉하고 있는 상태에서 표면 힘의 영향을 감소시킨다는 것을 암시한다. 그래서 거칠기돌기의 상호작용이 거친 표면의 응착력 해석에 있어서 추가로 고려되는 것이 필요하다.

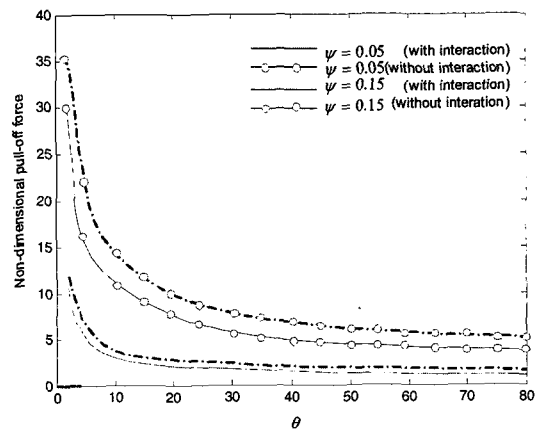


그림 6. 각각의  $\psi$  값에서  $\theta$ 의 함수로서의 분리력 값  
Fig. 6. Pull-off force as function of  $\theta$  for varying  $\psi$ .

#### IV. AFM을 이용한 응착력의 계측

응착력을 계측하기 위해 알루미늄 시편을 사용하였

으며 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.

가. 알루미늄 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 실리콘이다,

표면 형상관련 데이터를 얻기 위한 알루미늄 시편을 2개 사용했으며 시편의 스캐닝 사이즈는  $5\mu m \times 5\mu m$ 이다. Fig. 8.은 알루미늄 시편의 확대 이미지이고, 확대 이미지의 붉은 점선은 거칠기 높이의

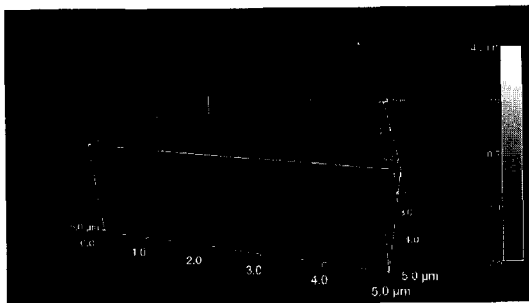


그림 7. 알루미늄 샘플 표면 거칠기의 3차원 이미지  
Fig. 7. 3-D image of surface roughness of aluminum sample.

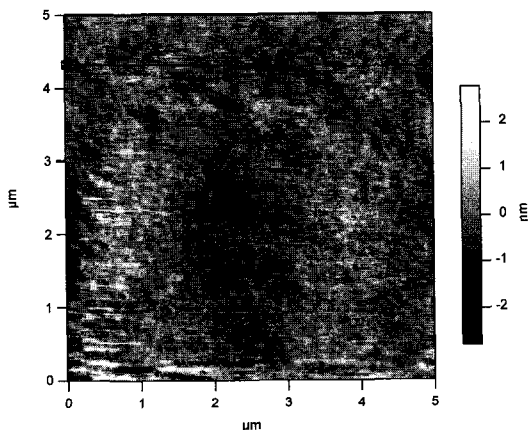


그림 8. 알루미늄 샘플의 표면 이미지  
Fig. 8. Surface image of aluminum sample.

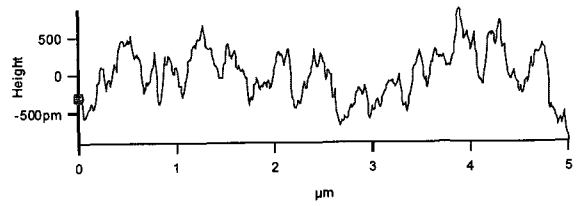


그림 9. 선택된 붉은 선에서의 거칠기 높이 값  
Fig. 9. Value of height of selected red line.

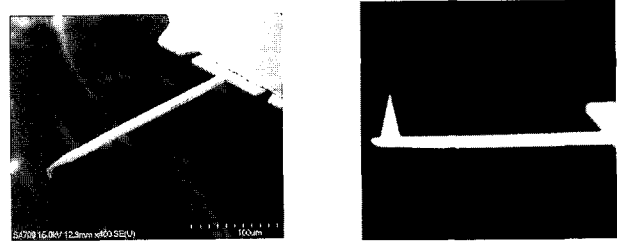


그림 10. 힘 측정의 위한 실리콘 팁의 SEM 이미지  
Fig. 10. SEM image of silicon tip for force measurement.

표 1. 알루미늄의 기본 물성치와 표면거칠기 매개변수

Table 1. Surface roughness parameters and basic properties of aluminum.

	sample 1	sample 2
r.m.s.	710.07 $\mu m$	692.38 $\mu m$
Curvature radius of asperity( $r$ )	0.754 $\mu m$	0.547 $\mu m$
Standard deviation of asperity's height( $\sigma$ )	2.75 nm	2.54 nm
hardness	0.62 GPa <sup>[17]</sup>	
Young's Modulus	70 GPa <sup>[17]</sup>	
Poisson's ration	0.33 <sup>[17]</sup>	
$N$ ( $\mu m^{-2}$ )	33.64	30.57
$\omega$	0.0335	0.0425

r.m.s. 값을 산출하기 위해 위한 스캔 영역이다. 스캔에 의한 그래프는 Fig 9.이며, 이에 대한 r.m.s. 값은 캔타레버 팁으로 스캔하는 영역에 따라 AFM에서 자동으로 산출되며, 또한 알루미늄 거칠기에 대한 3차원 이미지는 Fig. 7.에 나타났다. 그리고 식 (3)을 이용하여 71.4 GPa의 등가탄성계수를 구했다.

나. 알루미늄 시편과 AFM 팁 사이의 분리력 측정

분리힘 측정을 하기 위해서 알루미늄 시편 면적 3곳을 임의로 설정하여 각각  $5\mu m$  간격으로 20 군데를 측정 한 결과를 종합 평균하여 사용하였다.

Fig. 11.은 각 시편과 팁의 분리힘을 도출하기 위해 출력된 그래프를 각각의 샘플 별로 하나씩 보여준다. 과정은 Fig. 11.에 화살표로 표현된 바와 같다. 처음에

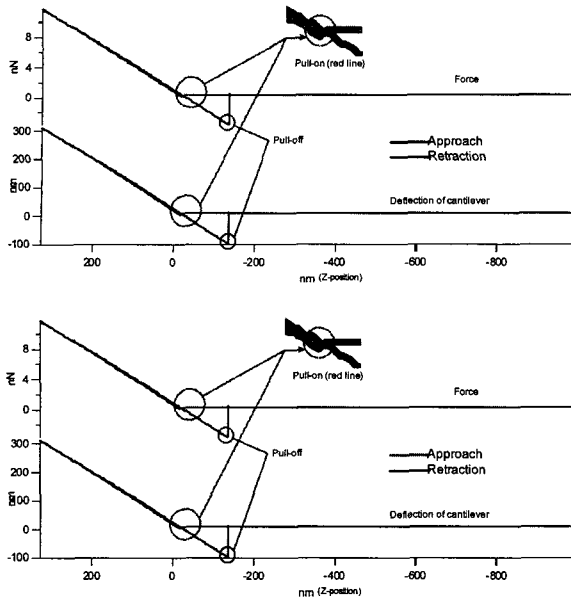


그림 11. 알루미늄 샘플과 팁 사이의 분리력 그래프  
 Fig. 11. Graph for pull-off force between Aluminum samples and tip.

표 2. 알루미늄 샘플과 팁 사이의 분리력과 임계치 짐값

Table 2. Values of critical deflection and pull-off force between tip and Aluminum sample

	Sample 1	Sample 2
Maximum deflection	97.07 nm	101.03 nm
Pull-off force	3.67 nN	3.81 nN

팁이 표면에 가까워진다(a 단계). 처짐이 생기기 시작하는 부분에서 굴곡이 발생한 것은 팁과 시편 사이에 인력이 감지되는 것을 나타내며(b 점), 이 굴곡지점 임계값에 이르러서 팁이 시편에 닿아 있음을 의미한다. 팁이 시편에 접촉 후에 표면에 분리가 된 후에도 응착력이 존재하기 때문에, 팁은 임계 처짐 값에 도달할 때까지 붙어 있는 상태로 존재한다. 이 임계 처짐이 분리점과 관련이 있다. 이론적으로는 분리힘은 임계 처짐 값에 캔틸레버의 탄성 계수를 곱하면 구할 수 있다. Fig. 11.에서 측정된 분리 점에서의 평균적인 힘과 임계 처짐은 아래와 같다.

이제 table 2.에서 보여준 분리힘 값을 이용해 응착일  $\Delta\gamma$ 를 구한다. 분리힘 값을 계산하기 위해 식 (2)를 이용한다. 계산을 한 결과는 아래와 같다.

지금까지 실험을 통해서 또는 계산을 통해서 얻어진 데이터를 가지고 탄성응착지수  $\theta$ 와 소성응착지수  $\psi$ 를 구하면 다음과 같다.

$\theta$  값은 한계 값인 10을 초과하지 않고  $\psi$  값이 0.125

표 3. 응착일 값

Table 3. Values of work of adhesion.

	Sample 1 and tip	Sample 2 and tip
$\Delta\gamma$	0.584 N/m	0.606 N/m

표 4. 각 응착지수의 값

Table 4. Values of each adhesion index.

	sample 1	sample 2
$\theta$	9.6230	9.2321
$\psi$	0.0544	0.0672

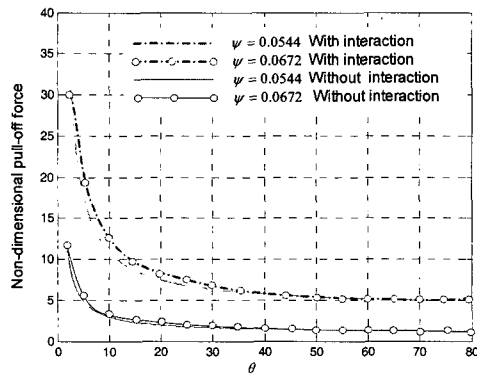


그림 12.  $\psi$ 가 0.0544와 0.0672일 때  $\theta$ 에 관한 함수로서의 알루미늄 샘플과 팁 사이의 무차원화된 분리력 값

Fig. 12. Non-dimensional pull-off force between tip and aluminum sample as function of  $\theta$  for  $\psi = 0.0544$  and  $\psi = 0.0672$

를 초과하지 않으므로, 탄성 변형과 소성 변형에 의한 영향이 발생될 것으로 예측할 수 있다.

이제 분리력을 산출하기 위해서 Fig. 6.과 같이 결정된 소성응착지수를 기준으로 탄성지수 변화에 따른 분리력을 산출한 그래프를 그리면 Fig. 12.와 같다.

Fig. 12.에서 각 샘플의 분리력을 찾으면, 첫 번째 샘플의 경우,  $\theta$ 가 9.6230일 때의 무차원화 된 힘을 찾으면, 상호작용이 고려될 경우 무차원화 된 힘은 대략 3.08이며, 상호작용을 고려하지 않았을 경우에는 11.39가 된다. 또한 두 번째 샘플의 경우  $\theta$ 가 9.2321일 때 무차원화 된 힘을 찾으면, 상호작용을 고려할 경우 3.28이고 상호작용을 고려하지 않을 경우, 13.43이 된다.

이제 무차원화 된 힘을 다시 원래대로 바꾸어야 하는데, 이 경우에 식 (5)에서 제시된 무차원 식을 이용한다. 하지만, 이 힘은 단위 면적당 힘이기에 때문에, 접촉 면적을 구해 곱해주어야 한다. 식 (3)을 이용하여 접촉 반지름  $a$ 를 구할 수 있고, 이를 이용해서 이론적인 접촉면적을 구할 수 있다. 이에 대한 결과를 그래프로 표현하면 아래의 Fig. 13.과 같다. Fig. 13.을 통해 거칠기 돌기

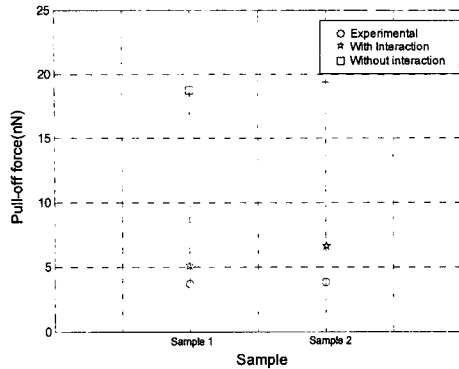


그림 13. 상호작용이 있을 때와 없을 때의 분리력 계산 값과 실험으로 측정된 분리력 값

Fig. 13. Numerical values (with and without interaction) and experimental value of pull-off force.

의 상호작용의 역할을 고려한 결과가 상호작용을 고려하지 않은 경우보다 훨씬 분리력 측정치에 가까워졌음을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

AFM으로 실제로 시편의 거칠기 형상 관련 데이터와 분리힘을 얻었으며, 이를 토대로 거칠기 돌기의 상호작용을 고려한 응착모델에 적용한 결과, 거칠기 돌기의 상호작용으로 인한 분리힘을 수치해석적으로 계산 했을 경우와 그렇지 않은 경우를 계산하였을 때, 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 제한적이다. 추후에는 형상에 대한 영향이 추가가 되어야 할 것이며, 높이 분포도 non-Gaussian인 모델도 다양하게 연구되어야 할 것이다.

#### 후 기

본 논문은 2006년도 서일대학 학술연구비에 의해 연구되었음

#### 참 고 문 헌

[1] “신기술동향조사 보고서-나노계측기술”, 특허청,

2003.

[2] B. Bhushan, “Handbook of Micro/Nano Tribology”, CRC Press, 1999.

[3] Israelachbili, J. N. and Tabor. D., “The measurement of Van der Waals dispersion forces in range 1.5 to 130 nm”. Proc. R. soc. London, A 331, pp.19~38, 1972.

[4] Skinner J. and Gane, N., “sliding friction under negative load”, J. of Phys. D, 5, pp. 2087~2094. 1972.

[5] K. L. Johnson, K. Kendall and A. D. Roberts, “Surface energy and the contact of elastic solids”, Proc. R. Soc. Lond. A., pp. 301~314, 1971.

[6] 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, Vol. 53, No. 2, pp. 314~326, 1975.

[7] K. L. Johnson, K. Kendall and A. D. Roberts, “Surface energy and the contact of elastic solids”, Proc. R. Soc. Lond. A., pp. 301~314, 1971.

[8] D. Maugis, “Adhesion of sphere: The JKR-DMT Transition Using a Dugdale Model”, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 150, No. 1, pp. 243~269, 1992.

[9] J. A. Greenwood, J. B. Williamson ., “Contact of nominally flat surfaces”, Proc. R. Soc., London, A 295, pp. 300~319, 1966.

[10] S. K. Roy Chowdhury and P. Ghosh, “Adhesion and adhesion friction at the contact between solids”, wear 174, pp. 9~19, 1994.

[11] W. R. Chang, I. Etsion, D. B. Bogy, “An elastic and plastic model for contact of rough surface”, j. of Tribology, Vol 109, pp. 257~263, 1987.

[12] L. Kogut, I. Etsion. “Adhesion in elastic-plastic spherical micro contact”, J. of Colloid and Interface science, Vol. 261, Issue 2, pp. 372~378. 2003.

[13] Xinghua Shi and Ya-Pu zao, “Comparison of various adhesion contact theories and the influence of dimensionless parameter”, J. Adhesion Sci. technol. Vol. 18, No. 1 pp.55~68, 2003.

[14] S. K. Roy Chowdhury and P. Ghosh, “Adhesion and adhesion friction at the contact between solids”, wear 174, pp. 9~19, 1994.

[15] K. L. Johnson, “Adhesion at the contact of solids, Theoretical and Applied Mechanics”, Amsterdam, Vol. 10, p.133, 1976.

[16] K.N.G. Fuller, D. Tabor, “The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solid”, Proc. R. Soc. A Vol. 345, pp. 327~332, 1975.



[17] M.A. Meyers and K. K. Chawla, "Mechanical Behavior of Materials", Prentice Hall, 1999.

저 자 소 개



김 규 성(정회원)  
1999년 중앙대학교 기계공학과  
(시스템.제어) 박사졸업  
현재 서일대학 자동차과 부교수  
<주관심분야 : 마이컴제어, 공장  
자동화, 설계자동화, 제어계측>



윤 준 호(정회원)  
1999년 중앙대학교 기계공학과  
(시스템.제어) 박사졸업  
현재 여주대학 자동차과 교수  
<주관심분야 : 공장자동화, 설계  
자동화, 제어계측>