

# 고탄성 고분해능을 갖는 응착력 측정장치의 개발

김규성\*, 윤준호#

## Development of Adhesion Force Measurement Apparatus with High Stiffness and High Resolution

Gyu Sung Kim\* and Jun Ho Yoon#

### ABSTRACT

To understand adhesive phenomena, we need to get force curve between two surfaces. And it is said that high stiffness force analysis system is needed to get precise force curve and more information of the surfaces. Usually the stiffness of the force measurement system is under the order of 10N/m. The stiffer force measurement system, however, results in more information on the surface, because higher stiffness lead to the wider range of force curves, secondly because the force curve obtained through the stiffer one describes more precise relationship between relative tip-sample separation and interaction force.

In this paper, considering for stiffness and resolution, the cantilever was designed and we made adhesion force measurement apparatus with high stiffness and high resolution, so we measured adhesive force between Ag-ball and wafer.

**Key Words** : Adhesion force (응착력), Cantilever beam(의팔보), Force curve(힘곡선)

### 기호설명

- $F_c$  = adhesion force
- $u$  = deflection of beam
- $\Delta u$  = resolution of displacement
- $\gamma$  = surface energy
- $\Delta\gamma$  = work of adhesion

### 1. 서론

최근 미세가공 기술에 힘입어 태동된 MEMS

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. MEMS 부품들이 작동 중 미세 표면력에 의하여 응착된 두 표면간의 응착력이 기계요소의 구동력보다 큰 경우, 미세 기계요소를 고착 시킬 뿐만 아니라 미세 표면 파손의 원인으로 작용하기 때문에 응착현상의 규명과 이에 따른 응착력 측정에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.<sup>1</sup>

접수일: 2006년 5월 11일; 게재승인일: 2007년 2월 1일

\* 서울대학 자동차과

# 교신저자: 여주대학 자동차과

E-mail jhyoon@mail.yeojoo.ac.kr Tel. (031) 880-5271

응착이론은 Hertz 의 contact mechanism 을 기초로 하여, JKR, DMT, MD, MYD 이론 등이 이미 발표되어 응착력 계측을 통해 이론을 검증하였으며, 현재 기존의 모델을 개선하여 응착력 계측을 하며 이를 지속적으로 검증하고 있다. 이 중 JKR 이론과 DMT 이론의 응착력 식을 이용해 간편하게 접촉하고 있는 두 물체의 고유 접착 에너지 혹은 응착 일(Work of Adhesion) 의 값을 구할 수 있다.

일반적으로 응착력을 계측하는 경우에 횡축에는 변위, 종축에는 힘을 표시한 force curve 를 사용하며, 이를 계측하는데 있어 시료를 변위시키는 과정에서 구동계에 micrometer 나 AC 모터를 사용한다. 이런 경우에는 변위를 직접 기록하는 것이 가능하지 않기 때문에 변위 속도를 일정하게 유지하여 출력에 걸렸던 시간을 기록하고 변위로 변환한다. 이 방법으로는 계측장비마다 정밀한 속도조절을 할 필요가 있고, 또 속도와 변위 사이에 발생하는 오차를 파악하는 것이 곤란하다는 문제점을 가지고 있다.<sup>2</sup> 그리고 미세 변위의 출력을 필요로 할 때에는 조작을 잘못한다면 샘플이나 계측계를 손상하는 가능성이 있으며, 수동으로 마이크로 미터를 조작 하는 것은 물론 AC 모터의 조작 속도 및 동작신호를 항상 정확하게 제어하는 것이 어려울 뿐만 아니라 이 구동계는 나사 이송 기구를 포함하고 있기 때문에 시료를 밀어 넣은 후에 떼어 놓는 동작에 들어 갈 때 반드시 Backlash 가 발생한다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 구동계에 PZT 를 도입하는 것이 효과적이다. PZT 는 전용의 controller 를 끼우는 것으로 전기 신호에 의해 주어진 입력신호의 정보를 선형으로 출력 하는 것이 가능하다. 따라서, 이것을 사용함으로써 정확하게 미세한 변위를 출력하는 것이 가능하고, 좀 더 명확한 force curve 를 그리는 것이 가능하다.<sup>2</sup>

따라서 본 연구에서는, PZT 를 구동계로 사용 하며, 고탄성 고분해능을 갖는 힘-변위 계측 시스템을 제작하고자 한다. 또한 제작된 시스템을 통해 접촉하는 두 물체에 대한 force curve 를 도출하고, 이에 따라 응착력을 계측하며, 실험에 사용된 두 물체 사이의 접착 에너지를 구하고자 한다.

## 2. 응착력 계측을 위한 실험 재료 및 보의 제작

### 2.1 실험재료(Ag-ball)

외팔보에 설치하는 pin 의 재료는 은을 이용 한다. Pin on disk 이론을 적용하기 위해서는 재료 끝은 구로 만들어야 한다.<sup>3,4</sup> 따라서 은선의 끝을 가공하여 샘플로 사용되는 구를 제작한다. 샘플을 만드는 절차는 다음과 같다.

1. 샘플을 고정하는 블록(edge, fig.3 참조)의 표면을 커터로 잘라 깨끗하게 한다
2. 블록을 아세톤으로 세정한다.
3. 은선을 라이터로 가열하고 샘플이 되는 구를 만든다.
4. 은선의 끝을 현미경으로 관찰하고, 만들어진 구의 상태를 확인 한다.
5. 샘플을 블록에 붙인다.
6. 블록을 외팔보에 설치한다.

은선과 블록의 설치에는 도전성 접착제를 이용한다.

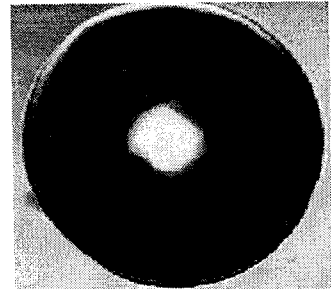


Fig. 1 silver ball

Fig. 1 은 은선 끝에 만들어진 구의 확대 사진이다. 은선의 끝에 만들어진 구의 곡률 반경은 대략 300  $\mu\text{m}$  이다.

### 2.2 외팔보의 제작

외팔보의 변위를 측정하기 위해서는 외팔보가 외부의 가진 요소에 대해 진동을 일으키지 않게 할 필요가 있다. 외부의 비교적 높은 주파수를 가진 진동은 장치 구성에서 절연이 가능하나, 10 Hz 전후의 낮은 주파수 진동은 절연이 가능하지 않아 외팔보가 외부의 저주파 진동과 공진이 일어나지 않게 하기 위하여 외팔보의 고유 진동수를 어느 정도 높게 해야 된다.

외팔보에 있어서 1 차 진동 모드는 계측점이 진동의 중앙에 가깝게 되므로 계측에 크게 영향을 미친다. 한편, 2 차 모드는 계측점이 진동 노드가 되고, 또한 3 차 모드는 1 차에 비해 진폭이 굉장히 작게 되므로 계측에 그 정도로 영향을 미치지 않는다.<sup>5</sup>

식 (1)와 식 (2)의 진동수 관련 조건을 고려한다.<sup>6</sup>

$$\omega_n = \lambda_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \quad (1)$$

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1.875}{l} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \quad (2)$$

여기서  $s$  와  $\rho$  는 보의 단면적 및 밀도이며, 1 차 고유진동수의 범위를 아래와 같이 설정한다.

$$f_1 \geq 70 \text{ [Hz]}$$

그리고, 식(3), 식(4)를 고려하여, 실제의 외팔보를 설계한다.

$$\kappa = \frac{F}{u(a)} = \frac{3EI}{a^3} \geq \kappa_{target} \quad (3)$$

$$\Delta F = \frac{6EI}{a^2(3l-a)} \Delta u \leq \Delta F_{target} \quad (4)$$

여기서  $\kappa_{target} = 4.20 \times 10^4 \text{ [N/m]}$ 로 결정하고,

$\Delta F_{target} = 3 \times 10^{-6} \text{ [N]}$ 로 결정하고,  $\Delta u$  는 변위 분해능이다.

계측에 사용하는 정전 용량식 접촉변위계의 변위 분해능  $\Delta u$  가 1 nm 이고, 이용하는 외팔보의 형상을 Fig. 2 에 나타낸 것과 같은 직방체로써 재료는 Stainless(SUS304)을 이용하고, 이 재료의 탄성계수  $E=205 \text{ GPa}$  이고, 밀도  $\rho=7.86 \text{ kg/m}^3$ 이다.

우선, 계측장치 전체의 크기는 외팔보의 길이  $l$  로 결정되므로 변위계의 크기를 고려하여 제작, 설계하기 쉽도록 하기 위해  $l = 40 \text{ mm}$ 로 정한다. 다음에  $f_1$  에 관한 조건을 식(2)를 대입하여  $h$  에 관하여 정리하면 다음과 같은  $h$  에 관한 조건을 얻을 수 있다.

$$h \geq 70 \cdot 2\pi \cdot \frac{l^2}{\lambda_1^2} \sqrt{\frac{12\rho}{E}} = 0.136 \text{ [mm]} \quad (5)$$

이것에 의해  $h = 0.15 \text{ mm}$  로 한다. 또한, 식(3) 및 식(4)을  $b$  에 관하여 정리하면

$$\begin{cases} b \geq \frac{4\kappa}{Eh^3} \cdot a^3 \\ b \leq \frac{\Delta F}{Eh^3 \Delta u} \cdot (3l-a)a^2 \end{cases} \quad (6)$$

식(6)와 같다. 이들은  $a$  를 변수로 하는  $b$  의 식이므로 식(6)이 나타내는 영역의 공통부분의 가운데에서  $a$  및  $b$  를 결정할 수 있다. 이 공통부분의 가운데에서 중심 부근 한 개의 적당한 값을 취하여  $a = 2 \text{ mm}$ ,  $b = 2.5 \text{ mm}$ 로 결정한다.

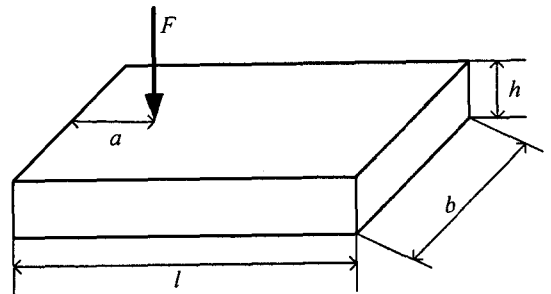


Fig. 2 The form of the cantilever

이상과 같은 형상의 외팔보를 이용하여 계측하면 설계상의 탄성계수와 분해능은 식(3) 및 식(4)로부터 계산하여

$$\kappa \cong 5.4 \times 10^4 \text{ [N/m]} \quad (7)$$

$$\Delta F \cong 1.0 \times 10^{-6} \text{ [N]} \quad (8)$$

을 구할 수 있다.

은구를 설치한 외팔보에 대한 개략도와 실제 제작한 외팔보의 사진을 Fig. 3 과 Fig. 4 에 나타냈다.

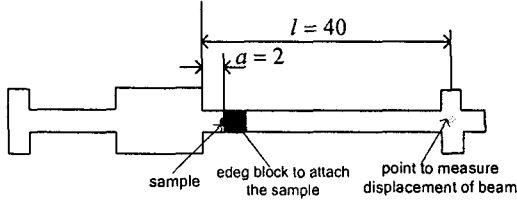


Fig. 3 Schematic illustration of cantilever beam

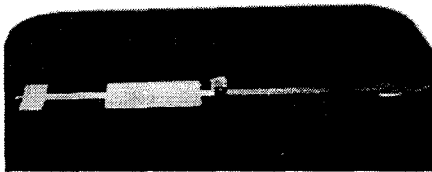


Fig. 4 photograph of cantilever beam

### 3. 실험장치 제작

#### 3.1 실험장비의 구성

본 연구에서 설계 제작된 미세 힘-미세 변위의 계측 시스템은 Fig. 5 과 같다.

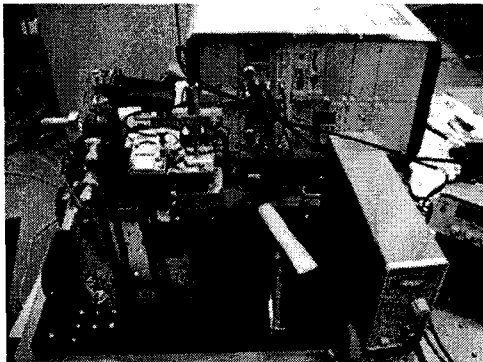


Fig. 5 Adhesive force measurement system

바로 앞 좌측에 있는 것이 계측계이고, pin on disk 구조로 되고 있다. 우측 바로 앞과 안쪽에는 각각 변위계의 Amp.와 PZT 의 controller 가 배치 되고 있다.

보가 설치되어 있고 변위계가 위치한 부분의 확대 그림을 Fig. 6 에 나타낸다. 스테이지의 좌측에 보가 고정되어 있고 은구가 보에 붙어 있으며, 우측에는 보의 탄성 변형량을 계측하기 위한 정전 용량식 접촉변위계가 장착되어 있다.

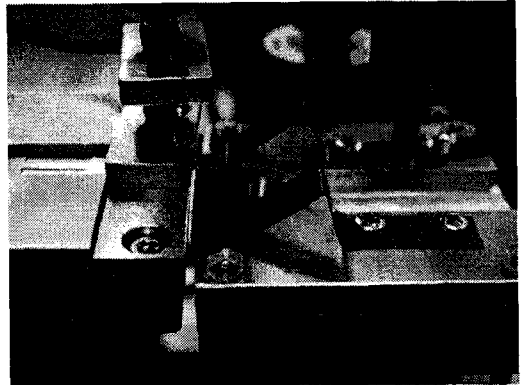


Fig. 6 Sample of Adhesive force measurement system

외팔보의 재료는 스테인리스 스틸로 샘플을 설치하기 위해 티탄제의 블록이 전도성 접착제로 접촉되어 있다.

외팔보의 고정단에서  $a$ 의 부분에 핀을 붙이고, 힘을 작용시킨다. 그리고 외팔보의 변위를 거리  $l$ 의 지점에서 정전 용량식 변위계를 이용하여 계측한다. 이렇게 하는 것에 의해 힘이 실제로 작용하는 점에서의 변위를 외팔보의 끝단으로 확대하는 것이 가능하다. 계측하는 힘을  $F$ , 외팔보의 끝단의 힘을  $u$ 로 놓으면,

$$F = \frac{6EI}{a^3(3l-a)}u \quad (9)$$

로 된다. 여기서  $E$ ,  $I$ 는 각각 외팔보의 종탄성 계수 및 단면 2차 모멘트이다.<sup>5</sup>

정전 용량식 접촉변위계의 출력은 선형의 직류 전류로써 출력고 이것을 힘으로 변환한다. 이 때 허용 되는 변위의 계측범위는 대강  $10 \mu\text{m}$ 이고, 분해능은 변위계로부터 출력되는 전압을 계측하는 기기의 전압 분해능으로 표현된다. 여기서 사용되는 제어기에 내장되어 있는 AD converter 의 경우,  $12.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ 의 힘 분해능을 갖는다.

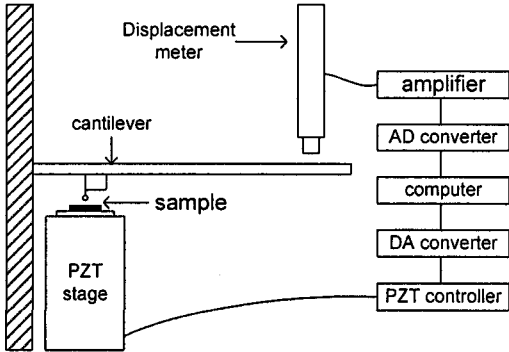


Fig. 7 Force-displacement Measurement System and Adhesive force measurement device

응착력 계측을 위해서 고탄성, 고 분해능 힘 센서를 본 연구에서 개발하는 힘-변위시스템에 접촉한 경우의 개략도를 Fig. 7 에 나타낸다.

제작된 Force curve 계측 시스템은 미리 설정해 놓은 변위의 출력 파형을 PZT 에 입력하고 그의 결과 얻어지는 힘을 기록하는 시스템이다. 여기서 PZT 컨트롤러의 변위 입력은 0~10 V 의 직류 전압을 이용한다. 이 때의 변위 출력 범위는 0~20  $\mu\text{m}$ 로 된다.

### 3.2 전압 데이터로부터 force curve 로의 변환

AD/DA converter 에 의해 출력된 데이터는 모두 전압 값으로 기록되고 있다. 이들의 데이터로부터 힘과 변위의 데이터를 얻기 위해서는 계측계의 강성 값과 PZT 의 응답을 사용하여 변환해야 한다. PZT 컨트롤러의 변위 입력이 0~10 V 이고 변위 출력 범위가 범위는 0~20  $\mu\text{m}$ 이므로 단위 전압당 출력 변위는 2  $\mu\text{m}/\text{V}$  가 된다. 그리고 외팔보의 샘플 접촉 점에서의 강성은 힘 선세의 설계 값으로  $5.4 \times 10^4$  [N/m]를 사용하며 보의 설계에 의하여 외팔보 끝단에서의 변위 확대율은 20 배가 되므로,

$$F = \frac{5.4 \times 10^4 \times 2 \times 10^{-6} \cdot V}{20} = 5.4 \times 10^{-3} \cdot V \text{ [N]}$$

의 관계를 얻을 수 있으므로, 이것을 사용하여 전압 값을 이용하여 힘으로 변환한다.

### 4. 응착력의 계측

계측된 전압 값을 통해 두 가지의 force curve 를 Fig. 8 과 Fig. 9 와 같이 나타냈다. Fig. 8 은 시간의 함수로써 힘의 변화를 보여주는 그래프이다. 초기 접촉 점은 0 초이다. 그래프 상에서 수직 축은 힘의 변화를 나타내며, 수직 축에서 영점을 기준으로 양의 방향의 힘은 압축 힘이고, 음의 방향의 힘은 인장력이다. 최대 양의 힘은 적용된 하중으로써 정의될 수 있고, 최소 음의 힘은 응착력으로 정의될 수 있다.

0~2 초 사이의 구간은 PZT 에 의해 샘플을 누르고 있는 구간이며, 2~4 초 간은 더 이상 힘이 가해지지 않은 샘플이 눌러있는 상태가 지속되는 것을 나타내는 구간이며, 4~6 초 PZT 에 가해진 힘을 제거하여 샘플과 웨이퍼가 분리되고 있는 구간이다.

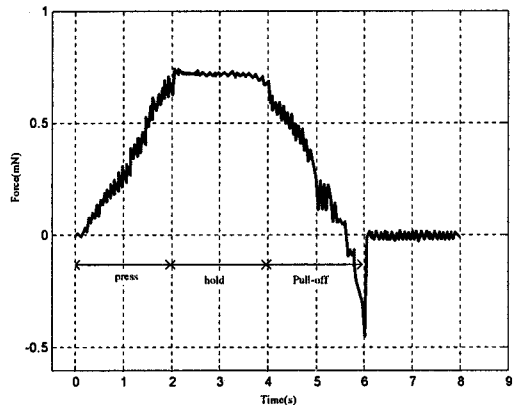


Fig. 8 Force curve for Time series data

2~4 초 구간에서는 전압 입력이 제거되어 있지 않은 상태에서 더 이상 가압되지 상태로 힘이 일정 하게 계측 되어야 하지만 처음보다 약간 힘이 작게 계측되는 이유는 가압 상태 이후에 보의 탄성 변형량이 고정되면서 변위계가 정상상태로 수렴 되는 과정에서 생기는 차이로 볼 수 있다.

Fig. 9 는 외팔보의 수직변위에 따른 힘의 변화를 나타낸 그래프이다. a-b 화살표는 샘플과 웨이퍼가 PZT 로 인해 샘플이 눌러는, 즉 서로 가까워져 접촉하는 구간이다. 정점을 지나 c 구간은 PZT 에 가해진 힘을 제거하는 구간이다. 샘플과 웨이퍼가 접촉 후 표면에 분리되기 시작해도 응착력이 존재하기 때문에 보가 임계

수직 변위량에 이르기 까지 샘플과 웨이퍼는 서로 붙어 있는 상태로 존재하며 임계 수직 변위량을 지나서는 샘플과 웨이퍼가 완전 분리된다. 바로 임계 수직 변위량 구간에서 바로 응착력이 계측된다.

300  $\mu\text{m}$ 와 응착력 430  $\mu\text{N}$  및  $c$  값을 식 (10)에 대입하면 각각 다음과 같이 고유 접촉에너지의 값을 구할 수 있다

$$\Delta\gamma_{JKR} = 0.304 \text{ N/m}, \Delta\gamma_{DMT} = 0.228 \text{ N/m}$$

### 5. 결론

정밀도를 요구하는 계측 장치에서 발생하는 백래쉬로 인한 문제점을 보완하기 위해 PZT 를 구동계로 하는 응착력 측정 장치를 구성하였다. 특히, 외팔보의 설계시 은구 샘플과 웨이퍼 표면 사이의 더 명확한 응착력 값을 계측하기 위해 외부 환경으로 인해 발생하는 진동에 대한 모드를 고려하여 큰 등가 탄성계수 값을 선정 했다. 그리고, 고가이며 사용이 복잡한 AFM 에서와 같은 패턴의 force curve 를 얻었고, 샘플과 웨이퍼가 분리되는 순간의 응착력 값이 대략 430  $\mu\text{N}$  임을 알 수 있었다. 또한 구해진 응착력 값을 통해 두 표면 사이의 접촉 에너지를 JKR 이론과 DMT 이론을 이용해서 구했다. 동종 금속간의 경우에 계측된 응착력 값을 JKR 이론의 응착력 식에 적용하면 표면 에너지를 간접적으로 구할 수 있다. 그리고 표면 미세가공 후 발생 하는 입자 오염물의 제거 공정에서의 효율을 높이기 위해서는 해당 입자의 응착력 값이 중요하기 때문에 본 논문에서 구성된 장치로 응착력을 계측하면 비교적 수월하게 이와 같은 과정에 접근이 가능할 것이다.

AFM 의 경우에는 레이저를 이용하여 간접적으로 측정하지만 본 논문의 장비는 정전용량식 접촉 변위계를 사용하여 직접 외팔보의 처짐을 구하기 때문에, force curve 가 주변 환경적인 요인과 센서로 인한 노이즈의 영향으로 굴곡이 전 구간에 걸쳐 존재한다. 따라서 Force curve 가 두 표면이 분리되는 순간의 값이 가장 중요한 데이터이기 때문에 명확한 계측을 위해서는 노이즈의 영향을 최소화할수 있는 필터의 설계와 적용이 요구되어 진다.

### 후 기

본 내용은 2005 년도 서일대학 학술연구비에 의해 연구되었음.

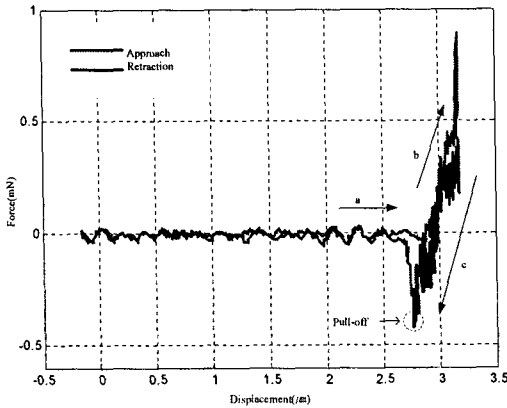


Fig. 9 Force curve for vertical displacement of beam

Fig. 8 과 Fig. 9 의 그래프가 매끄럽지 않고 약간의 요동이 발생하는 원인은 장치 자체에서 발생하는 노이즈와 외부 환경조건에 의해 발생 되는 노이즈로 볼 수 있다.

Fig. 8 과 Fig. 9 를 통해서 샘플과 웨이퍼가 분리 되는 분리힘 또는 응착력은 대략 430  $\mu\text{N}$  가 됨을 확인 할 수 있다.

이제 표면 접촉에너지를 구해보면, 어떤 표면에 응착되어 있는 구형 물체가 탄성 이라고 가정한다면, 응착력  $F_c$  는 다음과 같다.<sup>7,8</sup>

$$F_c = c\pi R\Delta\gamma \tag{10}$$

여기서  $R$  은 접촉하는 구의 반지름이고,  $\Delta\gamma$  는 고유 접촉에너지 혹은 응착일로 써 다음과 같다.

$$\Delta\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{1,2} \tag{11}$$

여기서  $\gamma_1$  와  $\gamma_2$  는 접촉하는 두 물체의 표면 에너지 이고,  $\gamma_{1,2}$  는 접촉하는 두 물체 사이의 계면에너지이다.  $c$  는 계수로서, JKR 이론에서는 1.5 의 값을 가지며, DMT 이론에서는 2 의 값을 갖는다. 실험에서 사용된 은구의 반지름 값

### 참고문헌

1. Yang, J. C. and Kim, D. E., "A Study on the Characteristics of Stiction and Friction of Textured Surface," Journal of KSPE, Vol. 19, No.7, pp. 51 - 57, 2002.
2. Lee, C. K., Itoh, T. and Suga, T., "Self-excited piezo-electric PZT micro cantilevers for dynamic SFM— with inherent sensing and actuating capabilities," Sens. Actuators, A Phys., Vol. 72, No. 2, pp.179-188, 1999.
3. Takahashi, K., Burnham, N. A., Pollock, H. M. and Onzawa, T., "Stiffness of Measurement System and Significant Figures of Displacement which are Required to Interpret Adhesion Force Curves," IEICE TRANS. ELETRON., Vol. E80-C, No. 2, pp. 255-262, 1997.
4. Takahashi, K. and Onzawa, T., "Effect of the Stiffness of Measurement System on adhesion force curve in the elastic continuum limit," J. Adhesion Sci. Technol, Vol. 10, No. 1, pp. 17-31, 1996.
5. Rao, S. S., "Mechanical Vibration," Prentice Hall, pp. 588 - 597, 2004.
6. Bhushan, B., "Handbook of Micro/Nano Tribology," CRC Press, pp. 83 - 89, 1999.
7. Shi, X. and Zhao, Y. P., "Comparison of various contact theories and Influence of Dimensionless load Parameter," J. Adhesion Sci. Technol., Vol. 18, No. 1, pp. 55-68, 2004.
8. Johnson, K. L., "Mechanics of Adhesion," Tribology International, Vol. 21, No. 8, pp. 413-428, 1998.