

원자현미경에서 나노허니컴 구조물의 홀 사이즈에 따른 점착 및 마찰 거동 분석

최덕현*·이평수**·황운봉***·이건홍**·박현철*

Pore size effects of adhesion and friction for nanohoneycomb structures in AFM

Dukhyun Choi, Pyungso Lee, Woonbong Hwang, Kunhong Lee, and Hyunchul Park

Abstract

This study analyzes the behavior of adhesion and friction according to the pore size of nanohoneycomb structures in atomic force microscope (AFM). Anodic aluminum oxide (AAO) films are fabricated as nanohoneycomb structures. According to the pore diameters of the nanohoneycomb structures, the adhesive forces and the frictional coefficients are obtained in AFM, and the behaviors are analyzed in the view of the contact area between the sphere particle and nanohoneycomb substrate. The effective Young's moduli of the nanohoneycomb structures are measured from the nanoindentation tests, and the contact areas at zero applied load are calculated by combining the porosity of the nanohoneycomb structures and the contact radius determined from JKR and DMT theory.

Key Words: Nanohoneycomb structure; Atomic force microscope; Anodic aluminum oxide; Contact area

1. 서 론

허니컴 구조물은 뛰어난 무게 대비 압축 강성으로 다양한 분야에 적용되고 있다. 나노기술의 발달과 함께 나노스케일의 홀사이즈를 가지면서 허니컴 구조를 지니는 나노허니컴 구조물(Nanohoneycomb structure)이 제조되고 있다 [1-2]. 나노허니컴 구조물 중에서 양극 산화 알루미늄은 쉬운 제조 공정 및 높은 종횡비, 그리고 간단한 홀 크기의 조절 등을 이유로 큰 관심을 받고 있다. 그림 1은 양극 산화 알루미늄의 전자현미경 사진으로 30nm의 홀을 갖는 시편을 제작 후 단 순 식각(Etching) 공정을 통해 제작한 다른 크기의 홀을 갖는 양극 산화 알루미늄이다.

나노허니컴 구조물은 정보 저장 장치, 나노 전지, 탄소 나노 튜브의 성장 모재, 촉매판, 나노 와이어의 복제 등 다양한 분야로의 적용이 가능하다. 현재 이러한 다양한 분야로의 적용을 위해, 나노허니컴 구조물의 기계적 특성 및 윤활 특성에 관한 분석이 요구되고 있다. 특히, 나노스케일에서의 윤활 특성은 마크로스케일에서와 달리 나노구조물의 특성에 지배적인 역할을 하기 때문에 다양한 방면에서 연구가 진행되어야 한다.

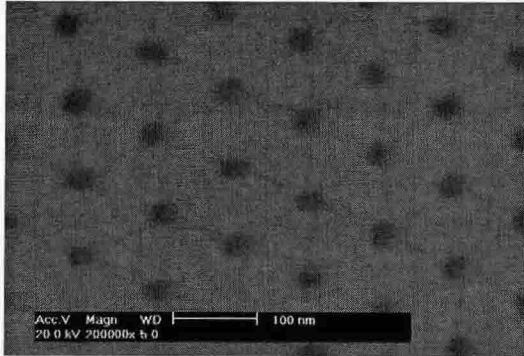
본 연구에서는 나노허니컴 구조물의 홀 크기에 따른 점착 및 마찰 특성에 관한 연구를 수행한다. 점착 및 마찰 특성은 접촉 면적에 지배적인 영향을 받기 때문에 접촉역학(Contact mechanics)과 나노허니컴 구조물의 기공률을 이용하여 나노허니컴 구조물에서의 접촉 면적 계산식을 유도하고자 한다. 접촉 면적을 계산하기 위해 나노인덴테이션 실험을 통해 나노허니컴 구조물의 홀 크기에 따른 탄성계수를 측정한다. 나노허니컴 구조물로서 양극 산화 알루미늄 시편을 다양한 홀 크기에 대해 제작하여 원자현미경에 점착력 및

* 포항공대 기계공학과

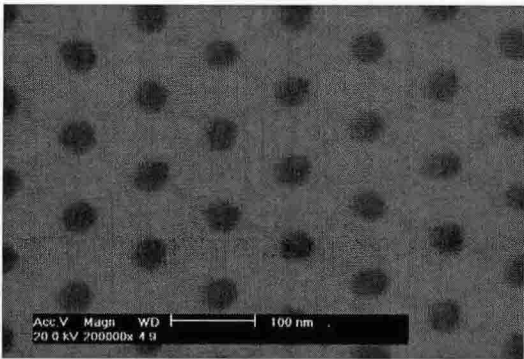
** 포항공대 화학공학과

* 포항공대 기계공학과 교신저자

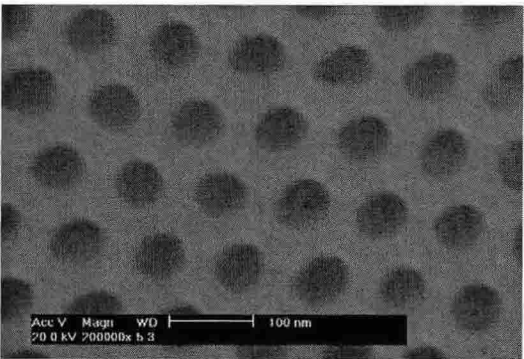
마찰 계수를 측정한다. 구해진 점착력 및 마찰 계수의 거동과 홀 크기에 따른 접촉면적과의 거동을 분석한다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 SEM images of AAO films fabricated at 40 V in 0.3 M oxalic acid solution. The widening time of the pores was (a) 0 min (b) 30 min (c) 50 min in 0.1 M phosphoric acid solution at 30 oC.

2. 이론

접촉 역학은 Hertz에 의해 제시된 이래, 점착력을 고려한 JKR (Johnson-Kendall-Robert) 이론[3]과 DMT (Derjaguin-Muller-Toporov) 이론[4]으로 확장되었다. JKR과 DMT 이론에서 반지름 R인 구형 분체가 평평한 면과 접촉 응력이 가해지지 않은 상태에서 접촉이 이루어질 때 점착력에 의한 접촉 반경은 다음과 같이 구해진다.

$$a_{0_JKR} = \left(\frac{6\pi\gamma R^2}{K} \right)^{1/3} \quad (1)$$

$$a_{0_DMT} = \left(\frac{2\pi\gamma R^2}{K} \right)^{1/3} \quad (2)$$

위식에서 γ 는 표면 에너지이고, K는 두 재료 사이의 환산 탄성 계수 (reduced elastic modulus)로 다음 식으로 계산된다.

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

위식에서 E1과 E2는 각 재료의 탄성계수이고 ν_1 과 ν_2 는 각 재료의 프와송(Poisson's) 비이다.

그림 2처럼 홀 간 거리가 ρ 이고 반지름 r인 홀이 육각형으로 배열 되어있는 표면에 구형 분체가 접촉하는 경우, 홀에 의한 물성 저하로 인해 식 (3)에서의 K값은 작아지고 이로 인해 식 (1~2)에서 접촉 반경은 증가하게 된다. 그러나 홀이 있는 표면과 구형 분체의 실 접촉 면적은 접촉 반경 내에 실제로 접촉하지 않는 홀의 영역을 빼주어야 하므로 다음의 식처럼 계산할 수 있다.

$$A_p = \pi a^2 - \frac{\pi a^2}{\sqrt{3}/4\rho^2} \cdot \frac{1}{2} \pi r^2 \quad (4)$$

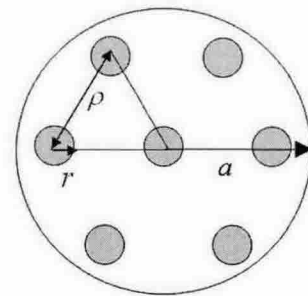


Fig. 2 Schematic diagram of contact area on hexagonally arrayed pores

식 (4)의 두 번째 항 첫 번째 부분은 접촉면적 내에 있는 삼각형 단위 셀의 개수이고 두 번째 부분은 단위 셀 내의 홀의 면적이다. 이때 식 (4)는 나노허니컴 구조물의 기공률(porosity), P로 다음처럼 정리될 수 있다.

$$A_p = \pi a^2(1-P) \quad (5)$$

따라서 나노허니컴 구조물에서의 접촉 면적은 접촉 역학의 이론과 허니컴 구조물의 기공률을 이용하여 식 (5)에 의해 계산할 수 있다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험 방법

나노허니컴 구조물로서 양극 산화 알루미늄이 Oxalic acid에서 제작 된다. 양극 산화 알루미늄의 제작 방법은 참고문헌 [5]에 자세하게 나와 있다. 본 연구에서는 Oxalic acid로 제작된 31nm의 홀 크기를 갖는 양극 산화 알루미늄 시편을 30°C, 0.1M의 Phosphoric Acid에서 식각 과정을 통해 41, 47, 52, 55, 59 nm의 홀 크기를 갖는 나노허니컴 구조물을 제작하였다.

제작된 나노허니컴 구조물의 홀 크기에 따른 점착력 및 마찰력 측정 실험을 Seiko SPA 400 원자현미경을 이용해 수행하였다. 점착력 및 마찰력 측정을 위한 원자현미경 팁의 반경은 30 nm (Si_3N_4), 280, 380, 930, 2280 nm (이상 SiO_2)였다. 접촉면적을 측정하기 위해 나노인덴테이션 테스트를 통해 홀 사이즈에 따른 유효 탄성 계수 (effective elastic modulus)를 측정하였다.

3.2 실험 결과

그림 3은 홀 크기에 따라 나노인덴테이션 실험에서 측정된 유효 탄성 계수를 보여준다. 유효 탄성 계수는 홀 크기가 커짐에 따라 감소되는 것을 볼 수 있다. 이는 홀이 커짐에 따라 시편의 변형률이 증가하기 때문으로 생각할 수 있다. 그림 4는 나노인덴테이션 실험을 통해 측정된 유효 탄성계수와 식 (5)를 이용해 계산한 홀 크기에 따른 접촉면적의 비율을 보여준다. 접촉 이론은 JKR과 DMT 이론 둘 다 이용하여 접촉 반경을 계산하였다. 일반적으로 다음과 같은 식에서 λ 값이 0.1보다 작으면 JKR이론이 유효하고 5보다 크면 DMT이론이 유효하다고 알려져 있다.

$$\lambda = 2 \frac{\gamma}{z_0} \left(\frac{R}{\pi \gamma K^2} \right)^{1/3} \quad (6)$$

위식에서 z_0 는 표면 재료의 평형상태 원자간 거리이다. 본 연구에서 수행한 시편과 팁에 대해 λ 값은 1.3에서 3.2 사이로 JKR이론과 DMT이론의 전이 상태에 놓이게 된다. 그러나 두 이론 모두 접촉면적 비율의 경향은 그림 4와 같이 같게 된다. 이러한 경향은 홀이 커짐에 따라 유효 탄성 계수는 계속 작아지지만 Porosity 또한 작아지기 때문에 접촉면적은 계속 작아지지 않고 작아지다가 다시 증가하는 것으로 생각할 수 있다.

그림 5는 홀 크기에 따른 점착력 실험 결과를 보여준다. 홀 크기가 커짐에 따라 점착력이 작아지다가 일정해지거나 커지는 경향이 나타났다. 이는 그림 4(b)의 접촉면적의 경향과 일치하는 것으로 나노허니컴 구조물의 점착력은 식 (5)로 계산된 접촉 면적의 경향을 따른다고 볼 수 있다. 그러나 2280nm의 팁에서는 홀 크기에 따라 점착력이 일정한 것을 볼 수 있다. 이는 팁 크기가 커짐에 따라 표면 특성이 접촉 역학 제시된 선형 관계를 벗어나기 때문으로 볼 수 있다.

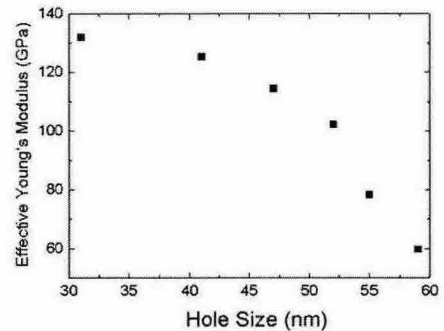


Fig. 3 Effective Young's modulus vs. hole size

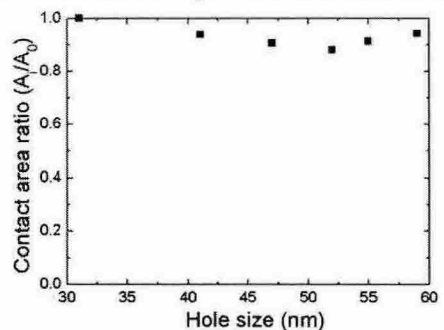
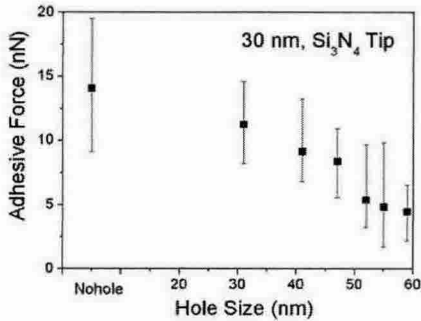
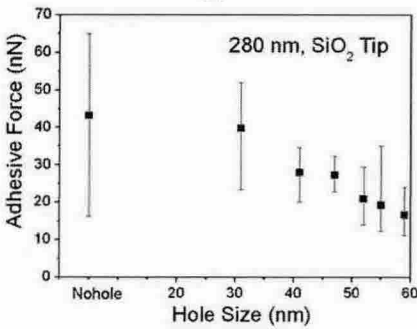


Fig. 4 Contact area ratio. A_0 is the contact area of hole size 31nm, and A_i is the others.

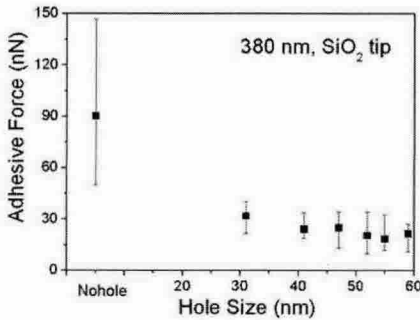
그림 6은 홀 크기에 따른 마찰 계수의 경향을 보여준다. 홀 크기가 증가함에 따라 마찰 계수가 증가하는 경향을 볼 수 있다.



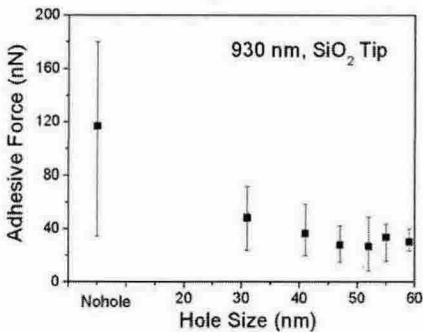
(a)



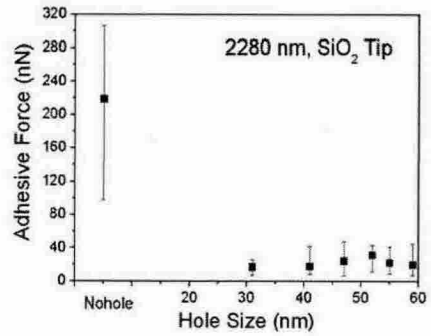
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 5 Adhesive force according to the hole size for each tip size

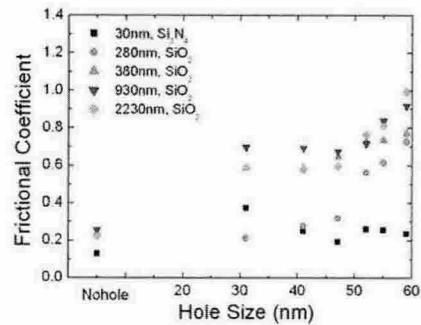


Fig. 6 Frictional coefficient behavior according to the hole size

4. 결론

본 연구에서는 나노히니컴 구조물의 홀 크기에 대한 점착 및 마찰 거동을 분석하였다. 점착력은 나노히니컴 구조물의 기공률을 고려한 접촉면적과 유사한 거동을 보였으며 마찰 특성은 홀 크기에 따라 증가하는 경향을 보였다.

후기

본 연구는 차세대 지능형 수술시스템 개발 센터(CISS-02-PJ3-PG6-EV04-0003)의 지원을 받아 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1)AM Hynes, H Ashraf, JK Bhardwaj, J Hopkins, I Johnson, JN Shepherd, Sensor Actuat. A-Phys. 1999;74: 13.
- (2)H Masuda, K Fukuda, Science, 1995;268:1466.
- (3)KI Johnson, K Kendall, AD Roberts, Proc. Roy. Soc. Lond. A 1971;324:301
- (4)BV Derjaguin, VM Muller, YP Toporov, J. colloid Interface Sci. 1975;53:314
- (5)K Nielsch, J Choi, K Schwim, RB Wehrspohn, U Gsele., Nano Lett. 2002;2:677.