

유효강성을 줄인 새로운 형상의 건식부착물 제작

조영삼[†]·정대환*·한혁섭*·김완두*

Fabrication of a novel dry adhesive structure with reduced effective stiffness

Young-Sam Cho, Dae-Hwan Jung, Houkseop Han and Wan-Doo Kim

Key Words: dry adhesive structure(건식 부착 구조물), effective stiffness(유효강성), hierarchical structure(계층구조)

Abstract

In the fabrication of dry adhesive structure, increasing contact-points or contact-area is the primary goal because the adhesive force grows in proportion to the contact-area. The simplest way to extend the contact surface is the fabrication by using soft materials. However, the column-array structure could confront the matting phenomenon which columns are stuck together. Therefore, we need a novel design to reduce the effective stiffness with adequate stiff materials like a gecko's setae. In this study, we propose a novel design for the dry adhesive structure. Moreover, we analyzed whether the adhesive structure conforms the rough surface sufficiently through finite element method adopted the non-bonding interaction as the body force. Also, we fabricated the novel structures via UV lithography and some techniques. In addition, we examined the adhesive force of the novel structures.

1. 서 론

게코 도마뱀으로 대표되는 자연계의 나노헤어가 부착과 관계된다는 사실은 이제 더 이상 새로운 주제가 아니다. 그럼에도 불구하고, 부착과 관계된 정확한 메커니즘이나 영향변수들에 대해서는 여전히 정성적으로나 정량적으로 정확히 알려져 있지 않다. Autumn[1] 등에 의해 하나의 강모(剛毛, seta)에 대한 부착력 실험이 행해진 이후, 많은 연구자들이 나노헤어의 부착 메커니즘에 대해 연구해왔다. 게코의 전체적인 움직임이나 해부학적 특징이 부착과 관련됨을 연구[2]한 경우도

있으며, 하나의 spatula가 갖는 부착력에 대한 실험들[3-5]도 있다. 또한, 나노헤어의 부착이 반데르발스에 의한 것이라는 주장[6]도 있고, 모세관 힘에 의한 것이라는 주장[4,5]도 있다. 이러한 기본 메커니즘에 관련된 연구 이외에도 나노헤어의 기구학적, 형상적 특징들이 부착에 미치는 연구들도 진행되어 왔는데, Shah와 Sitti[7]는 나노헤어들이 non-matting 조건을 만족하며 얻을 수 있는 부착 압력에 대한 계산과 나노헤어가 부착면에 대해 기울어지는 각도가 preload의 감소정도와 부착력의 증가정도에 미치는 영향을 평가하였고, Spolenak 등[8]은 나노헤어의 끝단의 형상에 따른 부착력 차이를 연구하였다. 또한 부착표면의 거칠기에 대한 부착력 변화에 대한 연구[9,10]도 있었으며, 나노헤어의 끝단을 구로 가정하고 JKR 이론을 사용하여 matting 조건과 부착력에 관한 adhesion design map을 만들어내 연구도 있었다. 하지만, 이러한 연구들은 대부분, 부착력의 모델로 끝단을 구로 가정한 JKR모형을 사용하였으며

[†] 회원, 한국기계연구원 미래기술연구부
E-mail :yscho@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7935 FAX : (042)868-7933

* 한국기계연구원 미래기술연구부

나노헤어 전체의 변형이 미치는 영향 등에 대한 연구가 간과되는 경향이 있었다. 본 연구자들은 반데르발스 힘을 FEM의 body force로 적용하는 방법을 사용하여 그 방법의 정확성과 수렴성을 검증하고 나노헤어의 stiffness가 부착현상에 미치는 영향을 알아보는 연구를 수행한 바 있다[11].

본 연구에서는 이를 확장하여 나노헤어의 stiffness가 거칠기를 갖는 표면에서의 부착력에 미치는 영향을 평가하고 이를 응용하여 유효강성을 낮추는 새로운 형상의 건식부착물을 제안하고 이를 제작하였다.

2. 나노헤어 인공구조물

2.1 기존의 건식부착물들

게코가 벽을 타고 올라가거나 천장에 거꾸로 매달려 자기보다 수십 배의 무게를 지탱할 수 있는 이유는 발바닥에 형성되어 있는 나노 헤어에 반데르발스 힘이 작용하기 때문이라는 사실을 2000년에 발견한 이후, 폴리머 또는 탄소나노튜브(CNT, Carbon Nanotube) 등으로 이러한 헤어 구조를 복제하려는 시도가 활발하게 진행되고 있다. 수직 표면을 올라가기 위해서 게코가 사용하는 건식 점착 방식은 기존의 점착 방식과는 근본적으로 다르다. 놀라운 사실은 헤어의 밀도(10^8 - 10^9) 뿐만 아니라 자가 세정(self-cleaning)의 기능이 있고 밀집된 헤어가 서로 뭉치지 않는다는 사실이다. 하지만 게코 발바닥을 모방하는 건식 점착체가 놀라운 성능을 가질 수 있지만, 적절한 탈착 및 부착을 위해서는 전체 운동 메커니즘의 연구도 중요하다.

단단한 모재위에 플라스틱 팁의 배열을 만들어 게코 발바닥의 헤어를 모방하려는 초기 시도는 실패하였다. 그 이유는 실제 표면이 평편하지 않아 단지 소수의 팁만이 상대 표면에 접촉하기 때문이었다. 그 이후, Sitti[12]는 인공적인 나노 구조물을 제작하는 방법으로서 원자현미경(AFM) 프로브를 왁스 표면에 압입하고 액체 폴리머를 압입된 위치에 채우고 경화시켜 떼어 내거나 에칭을 하는 방법과 몰딩 템플레이트로 나노기공(nano pore) 멤브레인(membrane)을 사용하고 진공상태에서 PDMS를 채워 넣는 방법으로 1:2 및 1:9의 세장비, 직경 $5.0 \mu m$ 및 $0.6 \mu m$ 를 갖는

기둥 구조물을 제작하였다. 또한 직류 전기장 하에서 액체 폴리머 박막의 불안정성을 사용하여 규칙적으로 배열되고 방향성이 있는 마이크로/나노 기둥을 성장시키기 위한 방법, 즉 유도자기배열(directed self-assembly) 방법을 개발하였다. 이와 같은 방법으로 제작된 인공 나노구조물의 점착 특성을 측정하여 실제 spatula 시편(약 $100nN$)과 유사한 측정값을 얻었다. 또한, Menon과 Sitti 등[13]은 사진식각공정(photolithography)와 DRIE를 이용하여 그림 1과 같은 구조물을 만들었다.

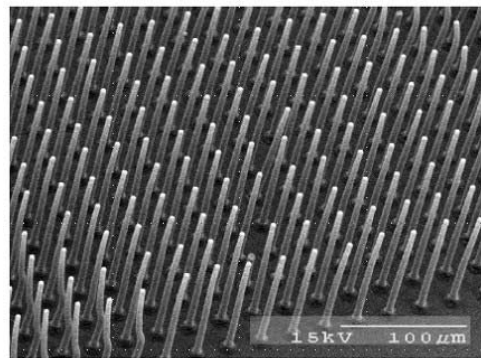


Figure 1. Nanohair structure fabricated by Menon et al.[13].

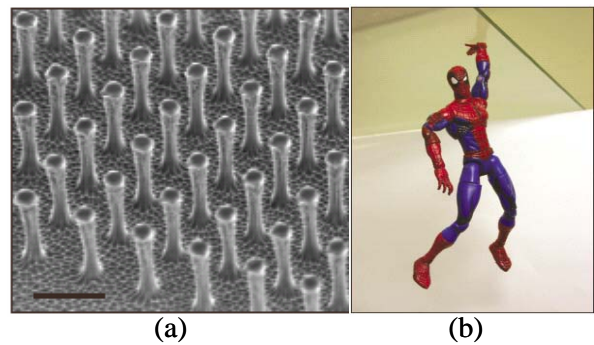


Figure 2. (a) Polyimide nanohair, (b) An application of dry adhesive structure[14].

Geim[14]은 실리콘 웨이퍼 위에 두께 $5 \mu m$ 폴리이미드 박막을 준비하고 기상증착법으로 알루미늄 박막을 적층한 다음, 전자빔 리소그래피를 사용하여 서브 마이크로 알루미늄 디스크 배열을 제작하였다. 제작된 알루미늄 디스크 패턴은 건식 식각으로 폴리이미드 박막에 전사되었다. 그림 2(a)은 제작된 폴리이미드 헤어를 보이고 있으며, 그림 2(b)는 무게 40 g의 스파이더맨 인형이 유리로 된 천장에 매달려 있는 모습으로서, 제작

된 헤어는 스파이더맨 손바닥에 부착되었다.

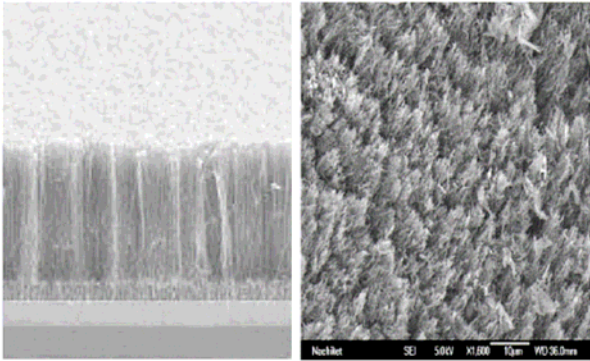


Figure 3. Dry adhesive structure using MWCNTs[15].

Yurdumakan[15]는 그림 3과 같은 PMMA 폴리머 표면에 수직 성장된 다층벽 카본나노튜브(MWNT) 헤어를 심는 제작 공정을 개발하여 게코 발바닥 헤어보다 200배 더 높은 점착력이 발생하는 성과를 올렸다.

기존의 이러한 건식부착물들은 그림 4와 같은 게코도마뱀의 강모 형상을 적절히 반영하지 못한 결과로 그 이유는 제작공정 상의 어려움과 그 형상이 갖는 특성을 정확히 파악하지 못하였던 것으로 사료된다.

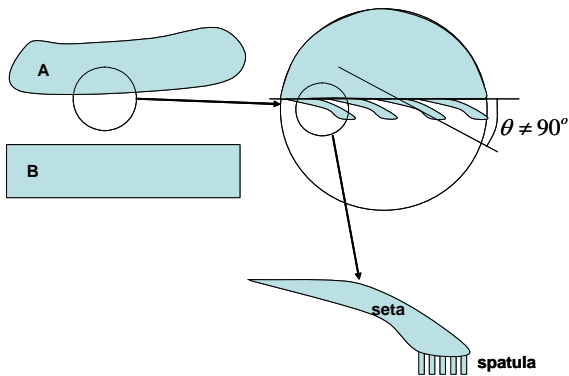


Figure 4. Schematics of hierarchical structure at the epidermis of Gecko's foot(A: a toe of Gecko, B: Wall or ceiling)

그림 4와 같은 강모의 비대칭성은 강모의 탈착을 용이하게 하는 특징을 가질 뿐 아니라, 유효강성을 낮추어 강모와 spatula들이 거친 표면에 보다 잘 적응하도록 하는 역할을 한다.

2.2 유효강성이 거친 표면에서의 부착력에 미치는 영향

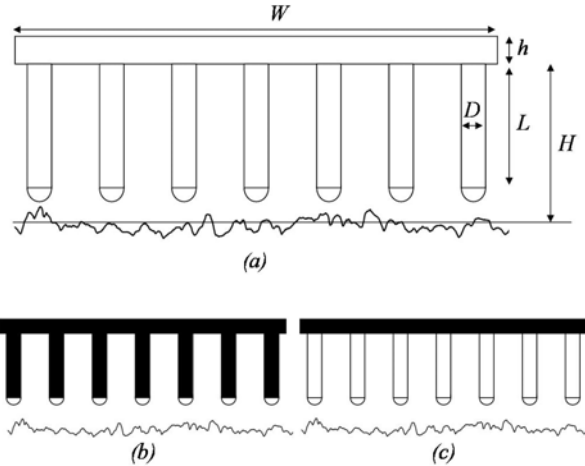


Figure 5. (a) A numerical model having 7 nanohairs, (b) A numerical model assumed as rigid body except the asperities of rods (c) A numerical model with rods and asperities assumed as elastic body (black:rigid body, white:elastic body)

그림 5와 같은 7개의 기둥을 갖는 모델에 대하여 기둥의 강성을 다르게 하여 그 강성의 변화가 나노헤어 어레이의 부착력에 미치는 영향을 계산해 보았다. 표면의 거칠기는 slide glass의 표면 거칠기를 AFM으로 스캔하여 얻은 결과이고, 탄성체의 물성과 반데르발스 상수들은 silicon에 대한 값들을 사용하였고, 그 값들은 $E = 190 \text{ GPa}$, $\nu = 0.28$, $\epsilon = 6.4116566 \times 10^{-21} \text{ J}$, $r_0 = 0.45498255 \text{ nm}$ 이다. 이 때, 반데르발스 힘은 상용 해석 프로그램인 ABAQUS에서 DLOAD를 사용하여 적용되었다. 그림 6은 그림 5(b)를 해석한 결과 얻어진 부착력으로 그 값이 약 9.5 nN/nm 에 불과하며, 이 값은 기둥하나에서 얻어지는 부착력에 불과하다. 그러나, 그림 7은 그림 5(c)를 해석하여 얻은 부착력으로 그 값이 약 21.2 nN/nm 로 그림 5(b)의 결과보다 매우 큰 값을 갖게 된다. 이는 기둥의 유효강성이 거칠기를 갖는 표면에서의 부착력에 큰 영향을 가짐을 알 수 있는 결과이다.

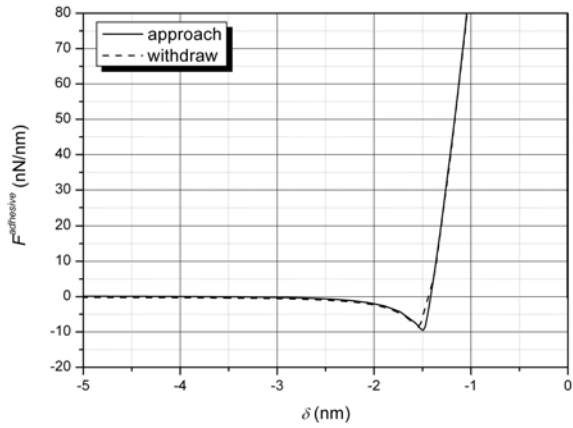


Figure 6. The adhesive-force result of Fig. 5(b)

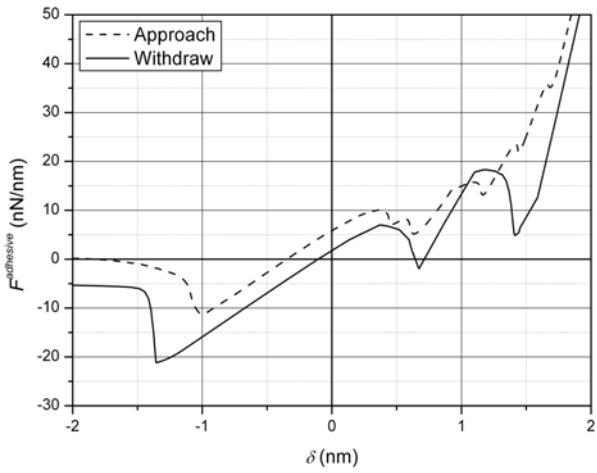


Figure 7. The adhesive-force result of Fig. 5(c)

2.3 새로운 형태의 건식부착물

앞에서 얻은 결과를 바탕으로 유효강성이 매우 작은 새로운 형태의 건식부착물을 설계하여 제작하였다. 그림 8과 같은 형태의 외팔보 위에 나노헤어를 갖는 형상을 상하좌우로 어레이처럼 생성하는 것이다. 이러한 형상은 외팔보가 수직의 기둥보다 매우 작은 유효강성을 갖는다는 데서 착안하여 동일할 소재로 제작하였을 경우 보다 작은 유효강성을 갖게할 뿐만 아니라, 외팔보들이 어레이 형태로 서로 독립적으로 형성되어 있어 독립적인 변형이 가능하여 거친 표면에서 보다 좋은 적응성을 갖게 될 것이다.

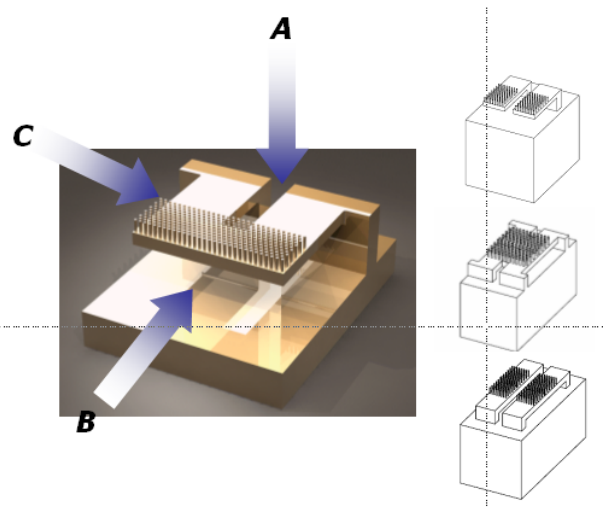


Figure 8. A novel dry adhesive structure with cantilever on which nanohairs are placed (This structure is repeated on all sides in the fabrication.)

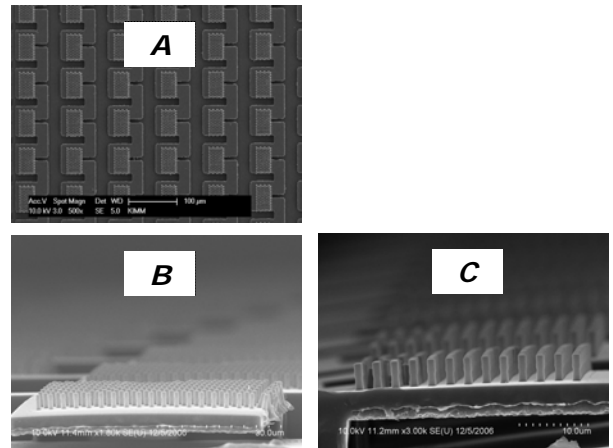


Figure 9. SEM photographs of fabricated novel structure at each direction depicted in Fig. 8

이렇게 제작된 새로운 형태의 건식부착 구조물은 Su8을 이용하여 UV lithography 공정으로 제작되었다. 제작된 구조물은 그림 9와 같은 형태를 갖게 된다. 미세 기둥들의 직경은 1 μ m와 2 μ m의 형태로 제작되었다.

4. 결론

게코 도마뱀의 강모와 spatula의 형상적 특징을 고찰하여 유효강성이 부착력에 미치는 영향을 파악하고, 이를 수치계산을 통하여 거친 표면에서의 부착력이 유효강성으로부터 영향을 받는다는

것을 밝혔으며, 이를 응용하여 새로운 형상의 건식부착물을 제안하여 Su8을 재료로 UV lithography 방법을 이용하여 제작하였다.

후 기

이 논문은 전문연구사업인 “자연모사 응용 바이오기계 시스템 기술 개발”의 지원에 의해 연구되었습니다.

참고문헌

- (1) Autumn, K., Liang, Y. A., Hsieh, T., Zesch, W., Chan, W.-P., Kenny, W. T., Fearing, R. and Full, R. J., 2000, "Adhesive force of a single gecko foot-hair," *Nature*, Vol. 405, pp. 681~685.
- (2) Russell, A. P., 2002, "Integrative Functional Morphology of the Gekkotan Adhesive System (Reptilia: Gekkota)," *Integr. Comp. Biol.*, Vol. 42, pp. 1154~1163.
- (3) Huber, G., Gorb, S. N., Spolenak, R. and Arzt, E., 2005, "Resolving the nanoscale adhesion of individual gecko spatulae by atomic force microscopy," *Biol. Lett.*, Vol. 1, pp. 2~4.
- (4) Sun, W., Neuzil, P., Kustandi, T. S., Oh, S. and Samper, V. D., 2005, "The Nature of the Gecko Lizard Adhesive Force," *Biophys. J.*, Vol. 89, pp. L14~L17.
- (5) Huber, G., Mantz, H., Spolenak, R., Mecke, K., Jacobs, K., Gorb, S. N. and Arzt, E., 2005, "Evidence for capillarity contributions to gecko adhesion from single spatula nanomechanical measurements," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 102, pp. 16293~16296.
- (6) Autumn, K., Sitti, M., Liang, Y. A., Peattie, A. M., Hansen, W. R., Sponberg, S., Kenny, T. W., Fearing, R., Israelachvili, J. N. and Full, R. J., 2002, "Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 99, pp. 12252~12256.
- (7) Shah, G. and Sitti, M., 2004, "Modeling and Design of Biomimetic Adhesives Inspired by Gecko Foot-Hairs," *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Shenyang, China.
- (8) Spolenak, R., Gorb, S., Gao, H. and Arzt, A., 2005, "Effects of contact shape on the scaling of biological attachments," *Proc. Royal Soc. Lond. A*, Vol. 461, pp. 305~319.
- (9) Persson, B. N. and Gorb, S., 2003, "The effect of surface roughness on the adhesion of elastic plates with application to biological systems," *J. Chem. Phys.*, Vol. 119, pp. 11437~11444.
- (10) Hui, C.-Y., Glassmaker, N. J. and Jacota, A., 2005, "How Compliance Compensates for Surface Roughness in Fibrillar Adhesion," *The Journal of Adhesion*, Vol. 81, pp. 699~721.
- (11) 조영삼, 한혁섭, 김완두, “나노헤어의 기계적 특성이 부착에 미치는 영향,” 대한기계학회 춘계 학술대회, 2006.
- (12) Sitti M. and Fearing, R. S., 2003, "Synthetic Gecko Foot-Hair Micro/Nano-Structures for Future Wall-Climbing Robot," *Proceeding of the 2003 IEEE, Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 1164~1170.
- (13) Menon C., Murphy M. and Sitti, M., 2004, "Gecko inspired surface climbing robot," *Proceeding of the 2004 IEEE, Int. Conf. on Robotics & Biomimetics*, pp. 431~436.
- (14) Geim, A. K., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., Novoselov, K. S., Zhukov, A. A. and Shapoval, S. Yu., 2003, "Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair," *Nature materials*, Vol. 2, pp. 461~463.
- (15) Yurdumakan, B., Raravikar, N. R., Ajayan, P. M., and Dhinojwala, A., 2005, "Synthetic gecko foot-hairs from multiwalled carbon nanotubes," *Chem. Commun.*, pp. 3799-3801.