

도마뱀 붙이의 건식 부착

조영삼, 정대환 | 한국기계연구원

1. 서론

2002년 Autumn 등^[1]이 Tokay Gecko의 발가락 표피에 존재하는 강모(剛毛, seta)의 부착력 실험을 행한 이후, 도마뱀 붙이에 대한 연구가 기존의 생물학 전공자들 뿐 아니라, 공학자들에 의해서도 활발하게 이루어지기 시작했다. 공학자들에 의해 연구되기 시작하면서 부착의 기구(mechanism)에 대한 토론이 이루어지기 시작했는데, 생물학적 부착 시스템을 가지는 동물들에 대한 많은 연구들에 의해 크게 두 가지 형태의 부착 시스템이 있음이 밝혀졌다. 동물의 종에 따라 수백 나노부터 수 마이크로미터에 이르기까지 다양한 굵기의 헤어구조물을 가지는 시스템과 미세조직의 표면에 상대적으로 부드러운 조직이 존재하는 시스템이다. 두 가지 형태의 구조물 모두 부착하려는 표면의 윤곽에 그 형상을 맞추어 접촉면적을 넓힐 수 있으며, 이는 부착력과 매우 관련이 깊다.

2. 부착 기구

부착 기구(mechanism)에 대한 주장은 2002년 이후 반데르발스 힘에 의한 상호작용력이 주된 요인이라는 설이 지지를 받고 있지만, 2005년 Sun 등^[2]과 Huber 등^[3]이 각자의 실험을 통해 모세관 힘이 주된 요인이라고 주장하기도 했다.

2.1 반데르발스 힘

생물학적 부착에 관여하는 기구(mechanism)들은 기계적 상호체결, 점액 분비, 분자간 상호작용 등이 있는데, 그 중 나노헤어 구조물과 깊이 관련 있는 기구는 Autumn 등^[4]의 연구에 따르면 반데르발스 힘에 의한 분자간 상호작용력이다. 부착과 관계되는 여러 가지 가설들에 대해 생각해 보면 다음과 같다.

1) 접촉력을 가지는 점액에 의한 부착

Autumn의 게코 도마뱀의 부착에 관한 연구와 그 연구의 참고문헌들에 따르면, 우선 게코 도마뱀은 발바닥에서 점액이 분비 되지 않으므로, 접촉력을 가지는 점액에 의한 부착은 논외로 생각할 수 있다.

2) 빨판형태의 부착

Dellit의 진공에서의 실험에 의해 빨판형태의 부착 또한 관계없음이 밝혀졌다.

3) 정전기력에 의한 부착

Dellit는 X선 충격실험도 행하여 이온화된 공기에서도 부착력이 유지됨을 실험하여 정전기력에 의한 부착가설도 배제되었다. 이후 Maderson의 연구에 의해 정전기력이 부착력을 강화하는데 도움을 줄 수 있다는 주장이 제기되기도 하였지만 여전히 주된 부착력이 정전기력에 의한 것은 아니었다.

4) 마찰력이나 기계적 체결에 의한 부착

마찰력과 기계적 체결에 의한 결합 역시 폴리시드 글래스(polished glass)나 매끄러운 SiO₂ 반도체에 부착되는 강력한 부착력을 생각할 때 관계없는 것으로 여겨진다.

5) 모세관 현상에 의한 부착

모세관 현상에 의한 분자상호력은 많은 곤충들의 주된 부착 기구이지만, 게코 도마뱀의 경우, 발바닥에 분비액이 없는데다 표면에너지에 따른 부착력 실험을 행하였던 Hiller조차도 모든 소수성 표면에서 접착력이 소멸되지 않는 이유로 게코의 부착이 모세관 기구에 의한 것이라 생각하지 않았다. 또한 모세관 기구에 의한 힘은 수직방향에 강하고 수평방향에 약하지만, Autumn의 강모(seta) 부착 실험에 의하면 수직방향보다 수평방향의 힘이 더 강하고, 발바닥에 부착패드를 가지는 게코 도마뱀의 서식지가 습기가 많은 지역에 국한되지 않고, 열대 우림에서부터, 건조한 사막에 이르기 까지 퍼져 있는 것으로 보아 습기가 효과적인 부착에 관여하지는 않는 것으로 생각된다.

6) 반데르발스힘에 의한 부착

반면, 반데르발스 힘은 분자상호력 중 가장 약한 힘이지만 가장 보편적으로 존재하는 힘이며, 분극화(polarizability)-반데르발스힘의 원인-가 매우 약한 PTFE (Polytetrafluoroethylene)에서 게코가 붙지 않았다는 실험이 반데르발스 힘이 부착기구일 것이라는 증거 중 하나이다.

결론적으로, Autumn 등^[4]은 나노헤어구조물의 주된 부착 기구는 그 구조의 특성상 얻을 수 있는 넓은 접촉면적간의 반데르발스힘으로 생각하였다.

2.2 모세관 힘

Sun 등^[2]과 Huber 등^[3]은 각각 습도가 다른 환경에서의 spatula 부착실험을 통해 모세관 힘이 주된 부착기구라는 주장을 하였다.

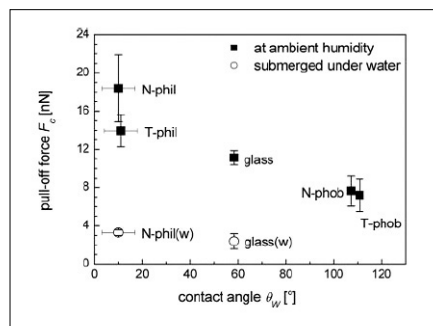


그림 1. 습도가 다른 환경에서의 spatula의 pull-off force와 contact angle^[3].

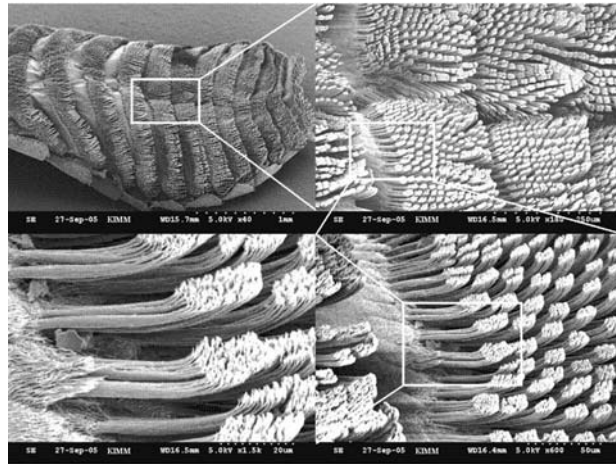


그림 2. 게코도마뱀 발가락에 존재하는 미세 계층적 구조

3. 도마뱀붙이(Gecko)

그림 2처럼 토케이 게코의 발바닥에는 약 백만 가닥의 강모(剛毛, seta)라고 불리는 케라틴 헤어가 존재하는데, 한가닥의 강모는 30~130 μm 의 길이를 가지고 있고, 그 끝에 200~500nm의 직경을 가지는 주걱모양의 나노구조물(spatula)이 수백 개가 달려있다. 한 가닥 강모의 부착력이 최대 200 μN 에 이르는 것으로 측정된 실험도 있고, 한가닥의 spatula의 최대 부착력이 10 μN (1000개의 spatula를 가지는 강모로 환산하면 한 가닥 강모의 부착력은 10 μN)인 것으로 측정된 실험도 있어 정확한 부착력에 대한 수치에 대해서는 논의가 필요한 것으로 생각되지만, 그렇다고 하더라도, 백만개의 강모를 갖는 게코 도마뱀의 발바닥의 전체 부착력을 생각하면, 그 힘의 크기가 10~200N으로 게코 도마뱀의 몸무게(약 50~100g)을 생각할 때 수십~수백의 안전계수(safety factor)를 갖는 과도한 디자인이라 생각할 수 있다. 그러나 서식지에서의 게코 도마뱀을 생각해 보면, 부착에 적합하지 않은 여러 형태의 장소를 돌아다니고, 먹이 사냥이나 포식자로부터의 회피 때 불안정한 자세에서의 부착을 고려하면 과도한 디자인이라 볼 수도 없을 것이다.

그렇다면, 이렇게 과도한 디자인으로 얻게 된 강력한 부착력을 가진 게코 도마뱀이 걷거나 뛰어 다닐 때, 어떻게 손쉽게 발바닥을 떼어낼 수 있을까? 그 해답은 그림 3과 같은 독특한 게코 도마뱀의 발가락 접힘(digital hyperextension)과 그림 4와 같은 강모의 비대칭형태의 구조로 설명될 수 있을 것이다. 그림 3은 유리에 붙어있는 도마뱀의 발바닥을 고속 카메라로 촬영한 것인데, 88ms에서 188ms까지 네 번째 발가락을 자세히 보면 발가락의 끝 부분부터 접혀짐과 동시에 탈착이 이루어짐을 알 수 있다. 이 때, 그림 2(a)에서 보는 것과 같은 여러 개의 얇은 판구조(lamella)의 위에 위치해 있는 그림 4와 같은 비대칭형의 세타의 한쪽에서부터 균열진전과 같은 탈착이 이루어지는 것으로 생각되어 진다.

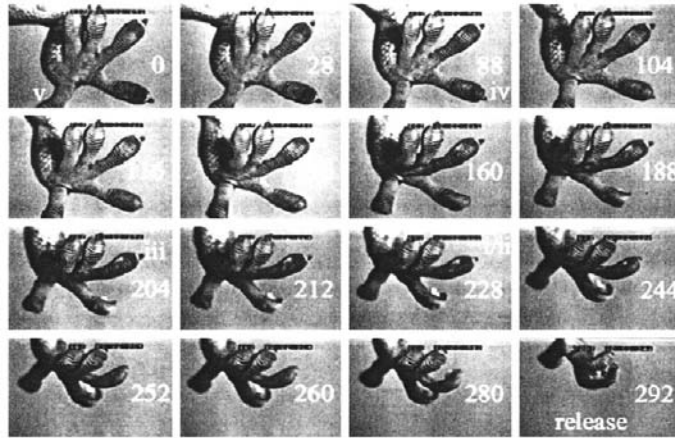


그림 3. 500프레임/초의 속도로 찍은 도마뱀붙이의 발가락 접힘현상. 아라비아 숫자는 밀리초를 의미하고 로마 숫자는 발가락번호^[5].

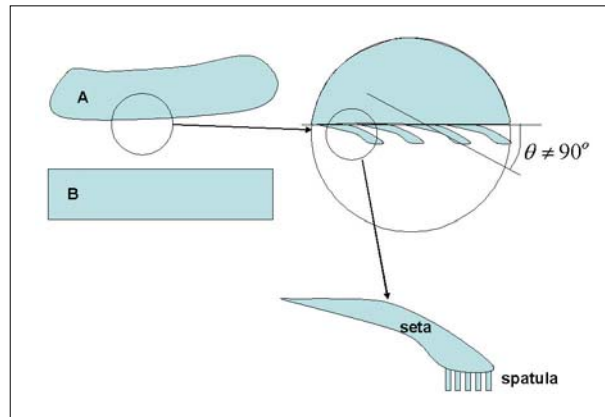


그림 4. 게코 도마뱀의 부착 구조물 개략도 (A:게코 도마뱀의 발가락, B:부착하려는 천장 또는 벽 등)

4. 나노헤어 인공구조물

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 점착제가 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^[6]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 μm 및 0.6 μm 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^[7]은 사진식각공정(photolithography)와 DRIE를 이용하여 그림 5와 같은 구조물을 만들었다. Geim^[8]은 실리콘 웨이퍼 위에 두께 5 μm 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 6(a)은 제작된 폴리이미드 헤어를 보이고 있으며, 그림 6(b)는 무게 40g의 스파이더맨 인형이 유리로 된 천장에 매달려 있는 모습으로서, 제작된 헤어는 스파이더맨 손바닥에 부착되었다.

Yurdumakan^[9]는 그림 7과 같은 PMMA 폴리머 표면에 수직 성장된 다층벽 카본나노튜브(MWNT) 헤어를 심는 제작 공정을 개발하여 게코 발바닥 헤어보다 200배 더 높은 점착력이 발생하는 성과를 올렸다.

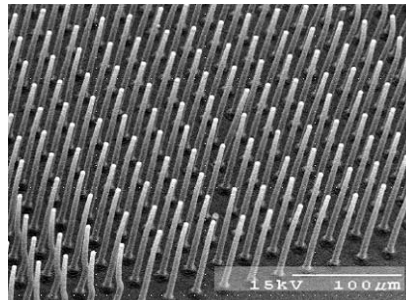


그림 5. Menon 등이 제작한 나노구조물^[7].

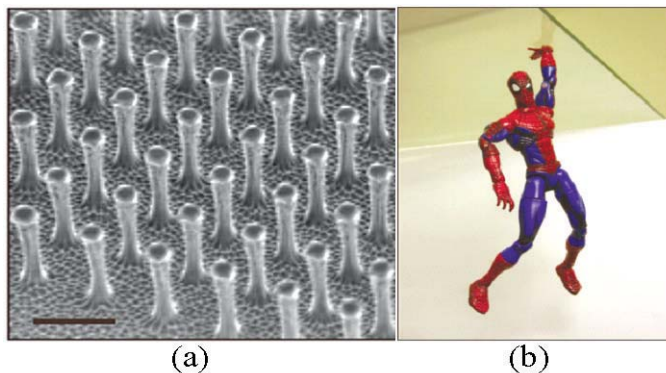


그림 6. (a) 폴리이미드로 제작된 미세구조물의 SEM 사진, (b) 게코의 건식부착 방식을 모방한 미세구조물을 응용한 예^[8].

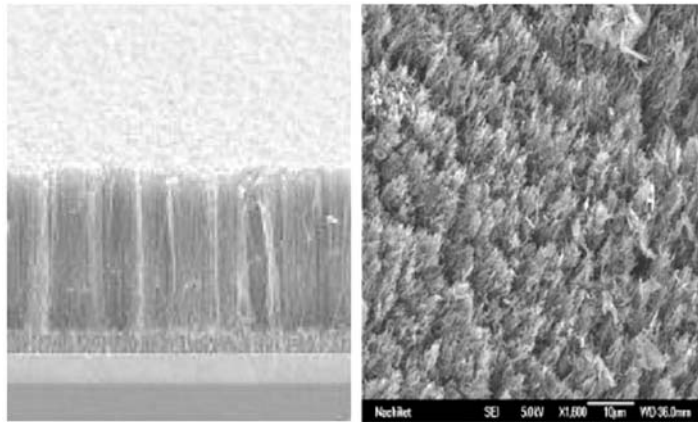


그림 7. 다중벽 탄소나노튜브가 수직으로 정렬되어 있는 구조물의 SEM 사진^[6].

5. 결 론

많은 연구들을 통해 나노헤어 구조물의 부착기구가 밝혀지고 있지만, 여전히 탈/부착과 관계되는 계층적 구조의 유기적 기구에 대한 연구는 미흡한 실정이며, 이러한 기구 규명에 관한 연구가 향후 진행되어야 할 것이다. 또한, 향후 인공 나노헤어 제작에 관해서는 다음과 같은 점들이 보완되어 진행되어야 할 것으로 생각된다. 먼저 제작 공정은 고가이고 느린 전자 빔 리소그래피 등과 같은 방법대신, 대량으로 반복적으로 제작이 가능한 공정기술이 적용되어야 할 것이다. 또한 충분히 유연성이 있으나 소수성이 강한 소재를 사용하여 반복적으로 탈착 또는 부착을 하여도 헤어들은 서로 붙지 않고, 탈착 및 부착 사이클에 대한 저항을 개선할 수 있어야 한다. 그리고 헤어들이 가능한 밀집된 배열이 되도록 함으로써 점착 강도를 증가시켜야 한다.

❁ 참고 문헌

- [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] 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.
- [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] 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.
- [5] Russell, A. P., 2002, "Integrative Functional Morphology of the Gekkotan Adhesive System (Reptilia: Gekkota)," *Integr. Comp. Biol.*, Vol. 42, pp. 1154~1163.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.



조 영 삼

· 한국기계연구원 미래기술연구부 선임연구원
· 관심분야 : 자연모사공학, 전산역학
· E-mail : yscho@kimm.re.kr



정 대 환

· 한국기계연구원 미래기술연구부 선임연구원
· 관심분야 : 표면미세구조
· E-mail : dhjung@kimm.re.kr