

도마뱀붙이의 부착능력

이 글에서는 도마뱀붙이(gecko)의 발가락에 존재하는 미세 헤어구조물이 갖는 독특한 건식 부착능력과 이와 관련된 연구들을 소개하고자 한다.

우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 몇몇 동물들은 우리가 알아차리지 못한 놀라운 능력을 가지고 있다. 수직의 벽이나 천장을 걸어 다니거나 뛰어다니고 있는 것이다. 우리에게 너무나 익숙해서 간과하기 쉬운 개미나 거미, 그리고 여러 절지동물들이 유리창이나 벽에 붙어있거나 걸어 다닌다. 또한, 토케이 게코(Tokay Gecko)로 대표되는 게코도마뱀들은 곤충들에 비해 매우 무거운 수십~수백그램의 몸무게에도 불구하고, 아무런 장비 없이 벽이나 천정에 매달려 견딜 수 있고, 심지어는 수직의 벽에서 자신의 몸길이의 20배에 달하는

거리를 1초에 달릴 수도 있다. 우리나라에서도 이런 도마뱀이 발견되는데, 도마뱀붙이(Gekko Japonicus)라는 동물이다.

나노헤어의 부착 원리

생물학적 부착 시스템을 가지는 동물들에 대한 많은 연구들에 의해 크게 두 가지 형태의 부착 시스템이 있음이 밝혀졌

다. 동물의 종에 따라 수백 나노부터 수 마이크로미터에 이르기까지 다양한 굵기의 헤어구조물

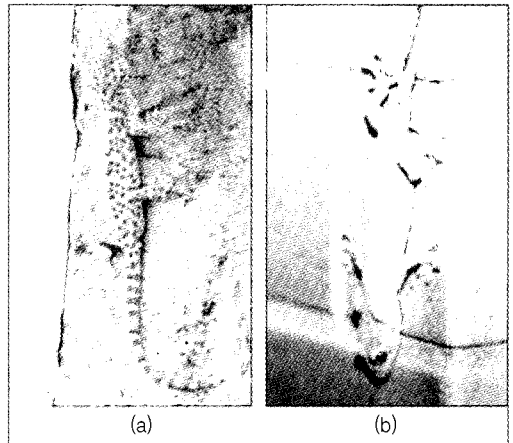


그림 1 (a)Tokay Gecko의 사진, (b)Gekko Japonicus의 사진(Sumio Okada, 1994)

을 가지는 시스템과 미세조직의 표면에 상대적으로 부드러운 조직이 존재하는 시스템이다. 두 가지 형태의 구조물 모두 부착하려는 표면의 윤곽에 그 형상을 맞추어 접촉 면적을 넓힐 수 있으며, 이는 부착력과 매우 관련이 깊다.

가. 반데르발스 힘

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

1) 접착력을 가지는 점액에 의한 부착

Autumn의 게코도마뱀의 부착에 관한 연구와 그 연구의 참고 문헌들에 따르면, 우선 게코도마뱀은 발바닥에서 점액이 분비되지 않으므로, 접착력을 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 정전기력

에 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) 모세관현상에 의한 부착

모세관현상에 의한 분자상호력은 많은 곤충들의 주된 부착 기구이지만, 게코도마뱀의 경우, 발바닥에 분비액이 없는데다 표면

에너지에 따른 부착력 실험을 행 하였던 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 seta 부착 실험에 의하면 수직방향보다 수평방향이 더 강하고, 발바닥에 부착패드를 가지는 게코도마뱀의 서식지가 습기가 많은 지역에 국한되지 않고, 열대우림에서부터, 건조한 사막에 이르기까지 퍼져 있는 것으로 보아 습기가 효과적인 부착에 관여하지는 않는 것으로 생각된다.

6) 반데르발스 힘에 의한 부착
반면, 반데르발스 힘은 분자상호력 중 가장 약한 힘이지만 가

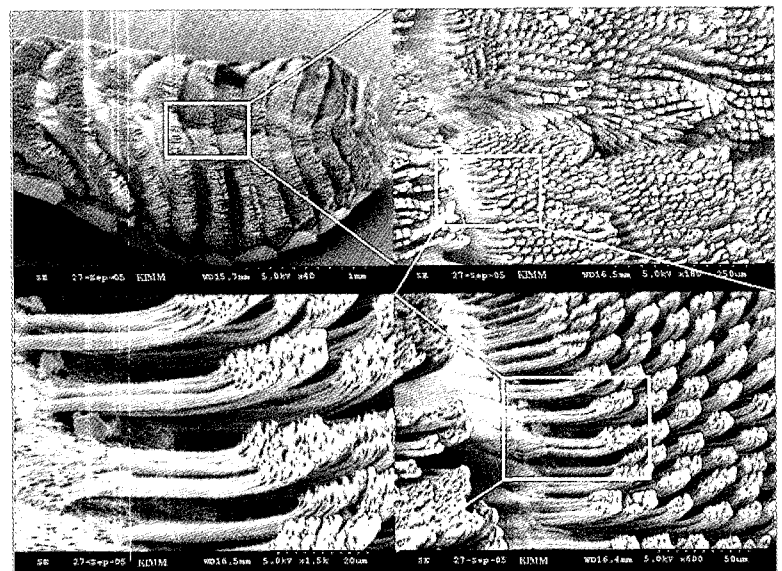


그림 2 게코도마뱀 발가락에 존재하는 미세 계층적 구조

장 보편적으로 존재하는 힘이며, 분극화(polarizability)-반데르발스 힘의 원인-가 매우 약한 PTFE(Polytetrafluoroethylene)에서 게코가 붙지 않았다는 실험이 반데르발스 힘이 부착기구 일 것이라는 증거 중 하나이다.

결론적으로, 나노헤어 구조물의 주된 부착 기구는 그 구조의 특성상 얻을 수 있는 넓은 접촉면적간의 반데르발스 힘으로 생각된다.

나. 도마뱀붙이(Gecko)

그림 2처럼 토케이 게코의 발바닥에는 약 백만 가닥의 강모(剛毛, seta)라고 불리는 케라틴 헤어가 존재하는데, 한 가닥의 강모는 $30\sim 130\mu\text{m}$ 의 길이를 가지고 있고, 그 끝에 $200\sim 500\text{nm}$ 의 직경을 가지는 주걱모양의 나노구조물(spatula)이 수백 개가 달려 있다. 한 가닥 강모의 부착력이 최대 $200\mu\text{N}$ 에 이르는 것으로 측정된 실험도 있고, 한 가닥의 spatula의 최대 부착력이 10nN (1,000개의 spatula를 가지는 강모로 환산하면 한 가닥 강모의 부착력은 $10\mu\text{N}$)인 것으로 측정된 실험도 있어 정확한 부착력에 대한 수치에 대해서는 논의가 필요한 것으로 생각되지만, 그렇다고 하더라도, 100만 개의 강모를 갖는 게코도마뱀의 발바닥의 전체 부착력을 생각하면, 그 힘의 크기가 $10\sim 200\text{N}$ 으로 게코도마뱀의 몸무게(약 $50\sim 100\text{g}$)를 생각할

때 수십~수백의 안전계수(safety factor)를 갖는 과도한 디자인이라 생각할 수 있다. 그러나 서식지에서의 게코도마뱀을 생각해 보면, 부착에 적합하지 않은 여러 형태의 장소를 돌아다니고, 먹이 사냥이나 포식자로부터

의 회피 때 불안정한 자세에서의 부착을 고려하면 과도한 디자인이라 볼 수도 없을 것이다.

그렇다면, 이렇게 과도한 디자인으로 얻게 된 강력한 부착력을 가진 게코도마뱀이 걸거나 뛰어 다닐 때, 어떻게 손쉽게 발바닥을

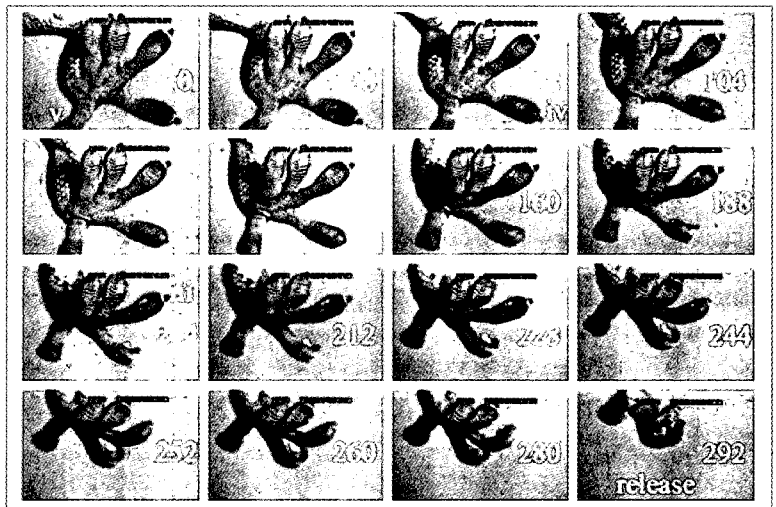


그림 3 500frame/sec의 속도로 찍은 도마뱀붙이의 발가락 접합현상. 아라비아 숫자는 msec을 의미하고 로마 숫자는 발가락번호.(Russell et al., 2002)

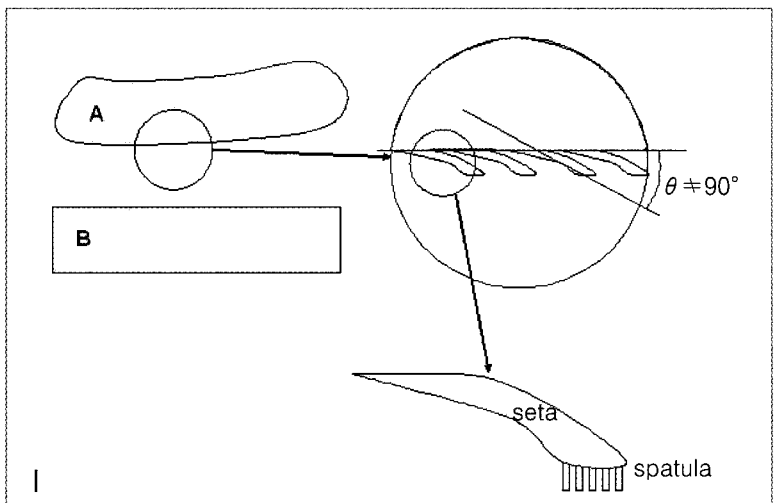


그림 4 게코 도마뱀의 부착 구조물 개략도 (A : 게코 도마뱀의 발가락, B : 부착하려는 천장 또는 벽 등)

떼어낼 수 있을까? 그 해답은 그림 3과 같은 독특한 게코도마뱀의 발가락 접힘(digital hyperextension)과 그림 4와 같은 강모의 비대칭 형태의 구조로 설명될 수 있을 것이다. 그림 3은 유리에 붙어 있는 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 한 쪽에서부터 균열진전과 같은 탈착이 이루어지는 것으로 생각된다.

나노헤어 인공 구조물

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 모재 위에 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, Sitti는 인공적인 나노 구조물을 제작하는 방법으로서 AFM probe를 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 DC 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 $100nm$)과 유사한 측정값을 얻었다. 또한, Menon과 Sitti 등은 photolithography와 deep reactive ion etching을 이용하여 그림 5(a)와 같은 구조물을 만들었고, 이를 이용하여 그림 5(b)와 같은 무한계도 차량이 수직의 유리 벽면을 타고 올라가는 실험을 성공적으로 행하였다. Geim은 실리콘 웨이퍼 위에 두께 $5\mu m$ 폴리이미드 박막을 준비하고 기상증착법으로 알루미늄 박막을 적층한 다음, 전자빔 리소

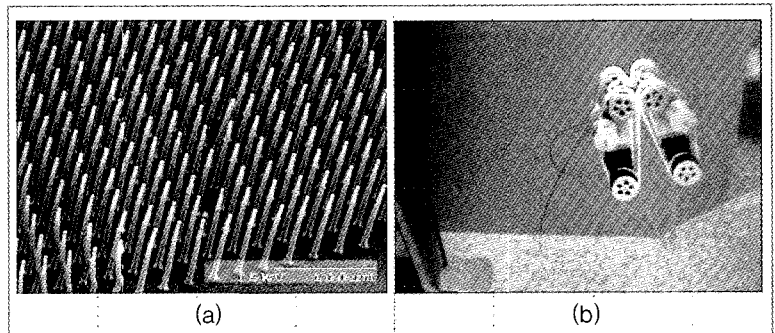


그림 5 (a) Menon 등이 제작한 나노구조물 (b) 제작된 나노구조물을 부착한 무한계도를 갖고 수직의 유리벽을 올라가고 있는 차량(Menon et al., 2003)

그래피를 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.

Yurdumakan는 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.

많은 연구들을 통해 나노헤어 구조물의 부착기가 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

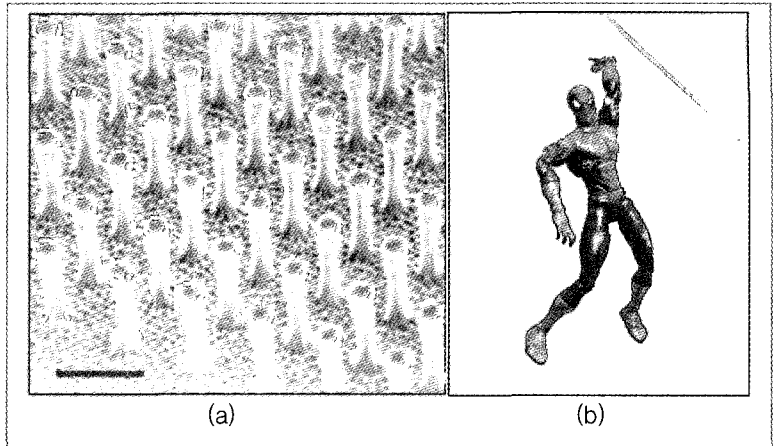


그림 6 (a) 폴리이미드로 제작된 미세구조물의 SEM 사진, (b) 게코의 건식부착 방식을 모방한 미세구조물을 응용한 예(Geim, A. K., 2003)

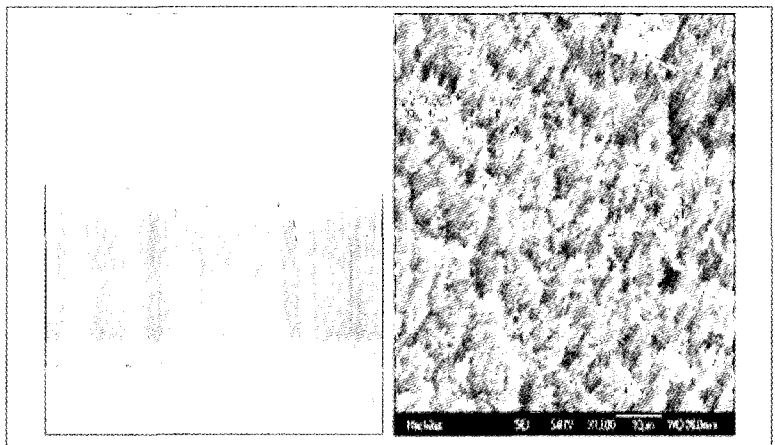


그림 7 다층벽 탄소나노튜브가 수직으로 정렬되어 있는 구조물의 SEM 사진 (Yurdumakan, B., 2005)

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 한 밀집된 배열이 되도록 함으로써 점착 강도를 증가시켜야 한다.