

# 유한요소법을 이용한 게코 접착 시스템의 분리 메커니즘에 대한 해석

## An Analysis of Detachment Mechanism of Gecko Adhesion System using Finite Element Method

김 원 배\* · 조 명 효\*\*

Kim, Wonbae · Cho, Maenghyo

### 요 약

본 논문에서는 seta와 spatula로 구성된 게코(gecko) 접착 시스템의 해석을 위한 새로운 adhesive beam contact model을 제시한다. adhesive contact 해석에 있어서 기존의 JKR model은 nano pillar와 같은 형태의 접촉방식의 해석에는 매우 유용하지만, seta와 같이 보(beam)의 형상을 가지는 구조물의 접촉방식의 해석에는 부적합하다. 따라서 본 연구에서는 seta와 같은 보의 형상을 가지는 접착 시스템의 해석을 위해 adhesive beam contact model을 제시하고, 유한요소 해석을 통하여 접촉면에서의 불균일한 응력분포 상태가 분리 메커니즘에 미치는 영향에 대한 해석 결과를 제시한다. 또한 spatula의 기하학적 형상과 보의 접촉각(contact angle)등이 seta adhesion system의 분리 메커니즘(detachment mechanism)에 미치는 영향에 대한 결과를 제시한다.

**keywords** : gecko, seta, spatula, adhesive contact, JKR model, van der Waals, beam, finite element

## 1. 서 론

게코 도마뱀은 비교적 큰 몸집에도 불구하고 딱정벌레, 파리, 거미와 같이 벽과 천정에 붙어 있거나 걸어다니는 능력을 가지고 있다. 이러한 기이한 현상에 대한 많은 연구로, 게코 도마뱀의 발은 그림 1과 같이 'seta'라고 불리는 머리털과 같은 강모들이 계층적 구조를 이루고 있음이 밝혀졌다(Artz, 2003). 게코 도마뱀의 발은 수십 만개의 setal array로 구성되어 있다. 곤충들의 seta 구조물과는 달리 게코 접착 시스템은 마이크로스케일에서 나노스케일로 구성된 계층적 구조를 가지며, 맨 끝단의 가지에는 'spatula'라고 불리는 주걱모양의 접착 패드가 달려 있다(Rizzo, 2006; Autumn, 2006).

많은 연구자들의 실험에 의해 게코 seta에 작용하는 접착력이 측정이 되었고, 게코 접착 메커니즘이 밝혀지고 있다. Autumn은 micro-electomechanical system(MEMS) 센서를 이용하여 single seta의 에 걸리는 수직력과 수평력을 측정하였고, 약 30°의 각도에서 분리(detachment)가 발생하는 현상을 측정하였다(Autumn, 2000). 게코 접착 시스템은 주로 접촉면 사이에 발생하는 반데르발스(van der Waals) 힘에 의한 영향을 받고, 모세관(capillary) 현상에 의한 영향도 약간 받는 것으로 알려져 있다(Autumn, 2002; Hurber, 2005).

\* 정회원 · 서울대학교 기계항공공학부 박사과정 wbkim@snu.ac.kr

\*\* 정회원 · 서울대학교 기계항공공학부 교수 mhcho@snu.ac.kr

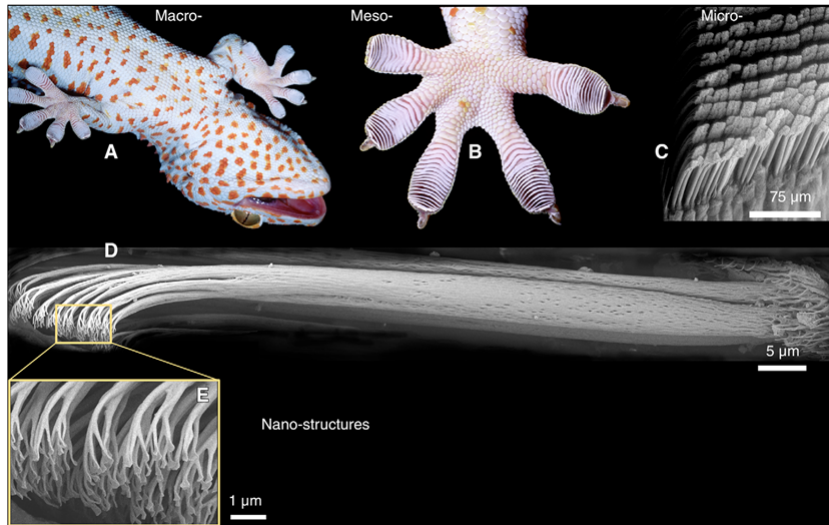


그림 1 Structural hierarchy of the gecko adhesion (Autumn, 2006)

이러한 게코 접착 시스템에 영감을 받아 인공적인 건식 접착 패치들이 만들어지고 있는데, 이러한 건식 접착 패치들은 PSAs(Pressure Sensitive Adhesives)와 같이 반데르발스 힘에 의한 접착 방식을 사용하고 있다(Ge, 2007; Qu, 2008; Jeong, 2009a; Jeong, 2009b).

두 개의 탄성체의 접촉면에서 발생하는 건식 접착(dry adhesive contact)의 해석에는 JKR 모델과 DMT 모델이 사용되어 왔다(Johnson, 1971; Derjaguin, 1975). 그러나 이러한 모델들은 수직방향에 대한 pull-off 힘을 계산하는데는 적합하지만, 전단력(shear force)과 굽힘 모멘트(bending moment) 하중을 주로 받는 게코 seta에는 적용할 수 없다. 그러므로 게코 seta의 접착 메커니즘의 해석을 위하여 전단력과 굽힘 모멘트의 영향을 포함하는 새로운 접착 모델(adhesive contact model)이 필요하다.

본 논문에서는 게코 seta의 접착 메커니즘 해석을 위하여 전단력과 굽힘 모멘트의 영향을 고려하는 새로운 adhesive beam contact model을 제시한다. 그리고 유한요소 해석을 통하여 굽힘 모멘트에 의해 발행하는 seta 끝단에서의 불균일한 응력 분포를 제시하며, 이러한 불균일한 응력분포가 분리 메커니즘에 미치는 영향에 대한 결과를 제시한다.

## 2. Adhesive beam contact model

그림 2은 adhesive beam contact model을 도시한 그림이다. 그림 2(a)는 일반적인 모델로 굽은 보(curved beam)의 형상을 가지는 모델이고, 그림 2(b)는 보다 더 단순화된 형태의 직선 보의 형상을 가지는 모델이다. Adhesive beam contact model의 경우 그림 2(c)와 같이 접촉면에서의 응력이 균일하지 않은 응력 분포(stress profile)를 가지게 된다.

접촉면에서 발생하는 최대 인장 응력(maximum tensile stress)이 반데르발스에 의한 힘보다 큰 경우에는 국지적으로 분리(detachment)가 발생하게 된다. 두 개의 평평한 접촉면에 작용하는 반데르발스 힘은 식(1)과 같이 간단한 식으로 표현할 수 있다.

$$F_{vdw} = \frac{H}{6\pi D^3} \quad (1)$$

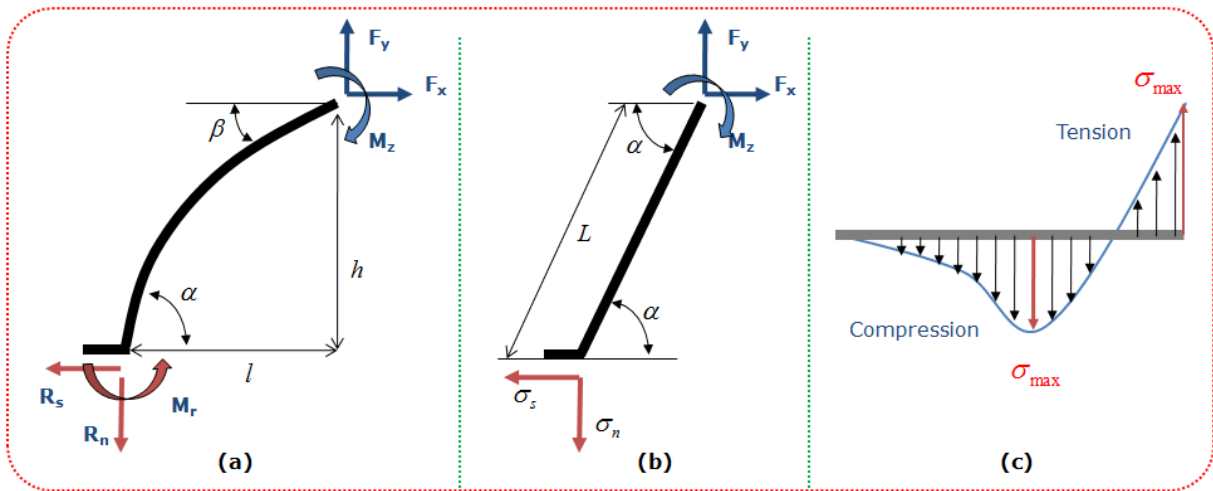


그림 2 Schematics of adhesive beam contact model (a) adhesive curved beam contact model. (b) adhesive simple beam contact model. (c) stress profile at contact region.

여기서  $H$ 는 Hamaker's constant로 일반적으로  $4 \times 10^{-20} \sim 4 \times 10^{-19}$ 의 값을 가지며,  $D$ 는 두 평면사이의 거리를 나타내는 값이다. 예를 들어 위의 식에  $H=6 \times 10^{-20} J$  과  $D=0.3nm$  값을 사용하여 계산하면, 단위 면적당 작용하는 반데르발스 힘은  $F_{vdw} = 118MPa$  가 된다.

### 3. FEM 해석 결과

Spatula와 접촉각(contact angle)의 영향에 대한 해석을 위해 비선형 유한요소해석(Finite Element Analysis)을 사용하였다. 그림 3는 유한요소해석 결과로 얻어진 보의 변형과 접촉면에서의 응력 분포를 나타낸 그림이다. Spatula tip pad가 있는 경우 정방향 하중이 부과될 때는 최대 인장 응력이, 역방향 하중이 부과될 때는 최대 압축 응력이 줄어들었고, spatula의 길이와 높이가 응력의 분산 효과에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

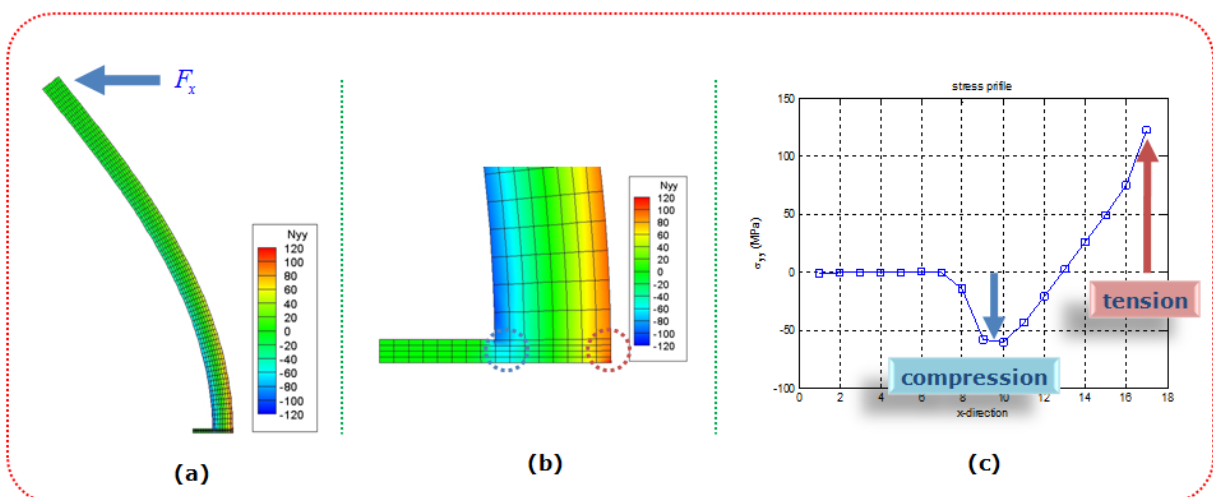


그림 3 Result of finite element analysis. (a) Deformation under parallel load. (b) Stress contour of spatula tip pad (c) Stress profile at contact region.

접촉 각(contact angle)도 응력 분포에 많은 영향을 주는데, 접촉각이 작아지면 안쪽의 접촉면에는 응력 집중 현상이 발생하고 바깥쪽 접촉면에는 응력 분산 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상은 정방향 하중시 더 많은 하중을 유지할 수 있게 하고, 역방향 하중시에는 더 쉽게 분리(detachment)가 일어나게 하는 역할을 한다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단이 주관하는 '국가지정연구실 사업(No. R0A-2009-000-20109-0)'의 지원을 받아 수행되었습니다.

### 참고문헌

- Arzt, E., Gorb, S. and Spolenak, R., (2003), "From micro to nano contacts in biological attachment devices", *PNAS*, Vol. 100, No. 19, pp. 10603-10606.
- Rizzo, N. W., Gardner, K. H., Walls, D. J., Keiper-Hrynko, N. M., Ganzke, T. S. and Hallahan, D. L., (2006), "Characterization of the structure and composition of gecko adhesive setae", *J. R. Soc. Interf.*, Vol. 3, pp. 441-451.
- Autumn, K., Majidi, C., Groff, R. E., Dittmore, A., and Fearing, R., (2006), "Effective elastic modulus of isolated gecko setal arrays", *J. Exp. Biol.*, Vol. 209, pp. 3558-3568.
- Autumn, K., Liang, Y. A., Hsieh, S. T., Zesh, W., Chan, W. P., Kenny, T. W., Fearing, R., Israelachvili, J. and Full, R. J., (2000), "Adhesive force of a single gecko foot-hair", *Nature*, Vol. 405, pp. 681-685.
- 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", *PNAS*, Vol. 99, No. 19, pp. 12252-12256.
- 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", *PNAS*, Vol. 102, No. 45, pp. 16293-16296.
- Ge, L., Sethi, S., Ci, L., Ajayan, P. M., and Dhinojwala, A., (2007), "Carbon nanotube-based synthetic gecko tapes", *PNAS*, Vol. 104, No. 26, pp. 10792-10795.
- Qu, L., Dai, L., Stone, M., Xia, Z., and Wang, Z. L., (2008), "Carbon Nanotube Arrays with Strong Shear Binding-On and Easy Normal Lifting-Off", *Science*, Vol. 322, pp. 238-242.
- Jeong, H. E., Lee, J-K., Kim, H. N., Moon, S. H., and Suh, G. Y., (2009), "A nontransferring dry adhesive with hierarchical polymer nanohairs", *PNAS*, Vol. 106, No. 14, pp. 5639-544.
- Jeong, H. E. and Suh, K. Y., (2009), "Nanohairs and noatubes: Efficient structural elements for gecko-inspired artificial dry adhesives", *Nano Today*, Vol. 4, pp. 335-346.
- Johnson, K. L., Kendall, K., Roberts, A. D., (1971), "Surface energy and the contact of elastic solids", *Proc. R. Soc. Lond. A* 324, pp. 301-313.
- Derjaguin, B. V., Muller, V. M., Toporov, Y. P., (1975), "Effect of contact deformations on the adhesion of particles", *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 53, pp. 314-326.