

보 접착 모델을 이용한 게코 접착 시스템의 접착 메커니즘에 대한 연구

A Study of Adhesive Mechanism of Gecko Adhesion System using Adhesive Beam Contact Model

김 원 배* 조 맹 효†
Kim, Wonbae Cho, Maenghyo

요 지

게코 접착 시스템은 보(beam)의 형상을 가지는 seta와 접착패드 역할을 하는 spatula로 구성된다. 본 논문에서는 보 접착 모델(adhesive beam contact model)을 사용하여 게코(gecko) 접착 시스템의 접착 메커니즘의 해석을 수행한다. 보 접착 모델은 접촉면에서 불균일한 응력 분포를 가지는 특징이 있으며, 접촉면에서의 최대 인장 응력(tensile stress)에 의하여 접착/분리 메커니즘이 결정된다. 접착패드 역할을 하는 spatula는 최대 인장응력을 감소시키는 역할을 하며, 이로 인해 접착력이 증가한다. 역방향 하중에 대해서는 spatula에 의하여 최대 압축 응력(compressive stress)이 감소하며, 이러한 현상에 의하여 접착력과 분리력의 비대칭성이 발생한다. 본 연구에서는 보 접착 모델의 해석을 위해 유한요소법(Finite Element Method)을 사용되며, spatula effect를 위한 해석 결과가 제시된다.

핵심용어 : 게코, 접착, JKR 모델, 보 접착 모델, 반데르발스, 유한요소법

Abstract

Gecko adhesion system consists of beam-shaped seta and spatula which has the role of adhesive pad. In this paper, adhesion mechanism of gecko adhesion system is performed by using adhesive beam contact model. this model has a feature of non-uniform stress profile on the contact surface and adhesion/detachment mechanism is determined by the tensile stress of the contact region. a spatula tip pad has the role of reduction of maximum tensile stress and adhesive force is increased due to this effect. As for a reverse loading case, maximum compressive stress drops by the spatula effect and this cause unsymmetric loading conditions between adhesion and detachment forces. In this study, finite element method is used for the analysis of adhesive beam contact model and the results for spatula effect are presented.

Keywords : *gecko, seta, spatula, adhesive contact, JKR model, Kendall peeling model, van der Waals, beam, finite element method*

1. 서 론

게코 도마뱀은 약 50g정도의 비교적 무거운 무게를 가지고 있음에도 불구하고 주변에 흔히 볼 수 있는 곤충들과 같이 벽과 천정에 붙어 있거나 걸어 다니는 능력을 가지고 있다. 이러한 현상으로 인해 게코 도마뱀은 많은 연구자들의 관심을 받아 오고 있으며, 최근 많은 연구자들에 의해 게코 도마뱀의 발은 그림 1과 같이 'seta'라고 불리는 머리카락과

같은 강모들로 이루어져 있음이 밝혀졌다(Artz, 2003). 게코 도마뱀의 발은 수십 만개의 setal array로 구성되어 있으며, 각각의 seta는 여러 단계의 계층적 구조를 이루고 있다.

Seta의 맨 끝단의 가지에는 'spatula'라고 불리는 주걱 모양의 접착 패드가 달려 있다(Rizzo, 2006; Autumn, 2006). 이러한 seta와 spatula 구조는 딱정벌레, 파리, 거미와 같은 곤충과 절지동물에서도 발견되는 구조물로, 크기가 커질수록 spatula의 크기가 작아지는 특징이 있다. 또한

† 책임저자, 종신회원 · 서울대학교 기계항공공학부 교수
Tel: 02-880-1693 ; Fax: 02-886-1693
E-mail: mhcho@snu.ac.kr

* 서울대학교 기계항공공학부 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 10월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

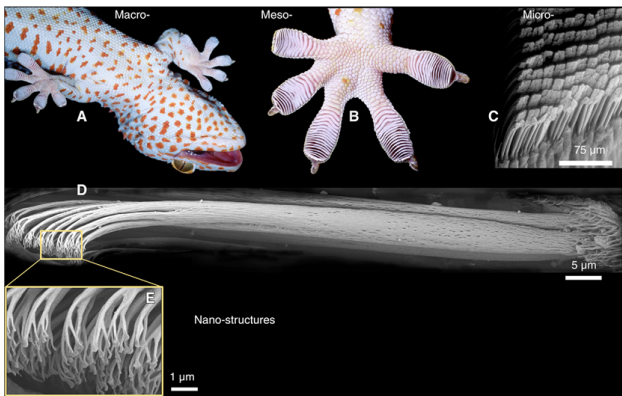


그림 1 Structural hierarchy of the gecko adhesion (Autumn, 2006)

같은 접촉 면적을 가지는 경우, 접촉패드의 크기가 작을 수록 더 큰 접착력을 나타낸다고 보고되고 있다(Artz, 2003).

이러한 게코 접착 시스템의 주된 원인으로서는 접촉면 사이에 발생하는 반데르발스(van der Waals) 힘으로 알려져 있고, 모세관(capillary) 현상에 의한 영향도 약간 받는 것으로 알려져 있다(Autumn, 2002; Hurber, 2005). 게코 접착력의 측정을 위해 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).

최근에는 이러한 게코 접착 시스템에 영감을 받아 그림 2와 같이 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; 2009b). 이러한 인공적인 건식 접착 패치가 원하는 성능을 가지도록 하기 위해서는 올바른 접착 해석모델이 필요하다.

기존의 접착 해석 방법으로는 JKR 모델과 Kendall peeling 모델이 사용되어 왔다(Johnson, 1971; Kendall, 1975). JKR 모델은 nano-pillar 형태의 접촉인 경우 수직방향에 대한 pull-off 힘을 계산하는데 적합하고, Kendall peeling 모델은 스키치 테이프와 같은 얇은 필름 타입의 접착 테잎을 벗겨내는 힘(peel-off force)과 각도(peeling angle)을 계산하는데 적합한 모델이다. 하지만 게코 seta와 같이 보(beam) 형상을 가지는 구조물인 경우, 전단력(shear force)과 굽힘 모멘트(bending moment) 하중을 주로 받기 때문에 기존의 JKR 모델과 Kendall peeling 모델로는 제대로 해석을 수행하기 어렵다. 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

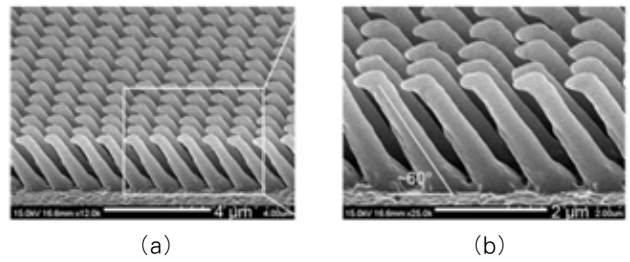


그림 2 Gecko-inspired synthetic adhesives(Jeong, 2009). (a) SEM image of angled PUA(polyurethane acrylates) nanohairs. (b) Magnified image from (a) with nanohairs that have spatula tip pads and inclined angles.

전단력과 굽힘 모멘트의 영향을 고려하는 새로운 adhesive beam contact model을 제시한다. 그리고 유한요소해석을 통하여 굽힘 모멘트에 의해 발행하는 seta 끝단에서의 불균일한 응력 분포를 제시하며, 이러한 불균일한 응력분포가 분리 메커니즘에 미치는 영향에 대한 결과를 제시한다. 또한 spatula 접착 패드에 의한 응력 분포의 변화를 통하여 spatula가 게코 접착 메커니즘에 미치는 영향을 제시한다.

2. 보 접착 모델(Adhesive beam contact model)

그림 3은 보 접착 모델(adhesive beam contact model)을 도시한 그림으로 그림 2의 접착 패치를 간략하게 모델링한 것이다. 그림 3(a)는 seta로 이루어진 얇은 접착 필름을 나타낸 그림이고, 그림 3(b)는 spatula 접착 패드를 가지는 seta의 형상을 보 접착 모델로 나타낸 그림이다. 보 접착 모델에서는 그림 2(c)와 같이 접촉면에서의 응력이 균일하지 않은 응력 분포(stress profile)를 가지게 된다.

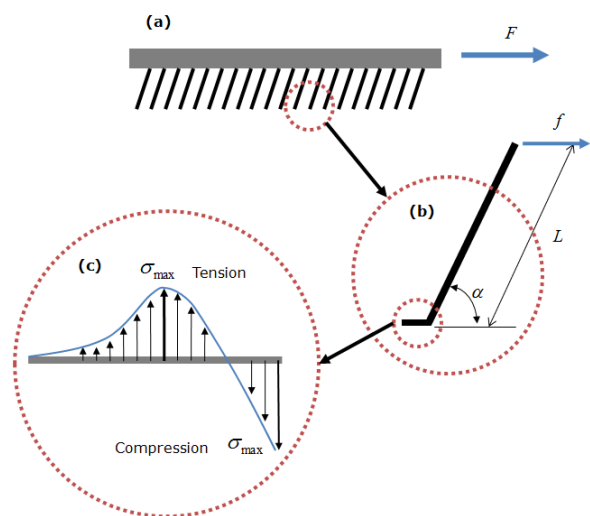


그림 3 Schematic diagram of the gecko-inspired adhesives system. (a) Adhesive patch composed of nanohairs under friction force. (b) Adhesive beam contact model with spatula tip pad. (c) Non-uniform stress profile on the contact region.

이 때 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(Israelachivili, 1992).

$$F_{vdw} = \frac{H}{6\pi D^3} \tag{1}$$

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. 유한요소 모델링

Spatula 접착 패드가 seta의 접착력에 미치는 영향에 대한 해석을 위해 비선형 유한요소해석(Finite Element Analysis)을 사용하였다.

보의 기하학적인 형상과 함께 보 접촉 모델에 사용되는 주요한 설계 인자로는 spatula의 길이와 두께 그리고 그림 3(b)에 나타나 있는 접촉각(contact angle) α 가 있다. 본 연구에 사용된 유한요소 해석에서는 seta의 길이와 두께를 각각 $2\mu m$ 와 $0.1\mu m$ 로 하였고, 접촉각 α 는 90° 로 고정하였다. 보 접촉 해석에는 약간의 정량적인 오차는 있지만 경향성을 조사하는데는 효율적이라 판단되어 3차원 해석모델 대신에 평면변형율(plane strain) 가정에 의한 2차원 모델을 사용하였다. Seta 모델에는 가로와 세로 방향으로 각각 8개와 80개의 4절점 요소가 사용되었으며, 640개의 4절점 요소와 729개의 노드로 구성되어 있다.

비선형 해석에는 Total Lagrangian을 사용하였고, 재료 비선형 재질로 neo-Hookean 재료를 사용하였다. 재료는 게코의 β -keratin과 유사한 재질인 PMM를 사용하였으며, 영률(Young's modulus)과 포아송비(Poisson's ratio)의 값으로 각각 2.4GPa과 0.4를 사용하였다. Seta에 가해지는 하중은 그림 4(a)와 같이 friction force 형태로 가해지며, 본 연구에서는 0에서 10nN까지 힘을 20단계로 나누어 점차 증가시켜 가면서 해결 결과를 도출하였다. 변위 경계 조건으로 spatula의 접촉면은 아랫면에 완전하게 접촉되어 있다는 가정하에 접촉면의 노드는 수직방향과 수평방향 모두 고정하였다.

Spatula 접착 패드에 의한 영향을 알아보기 위해 spatula의 길이와 두께를 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 먼저

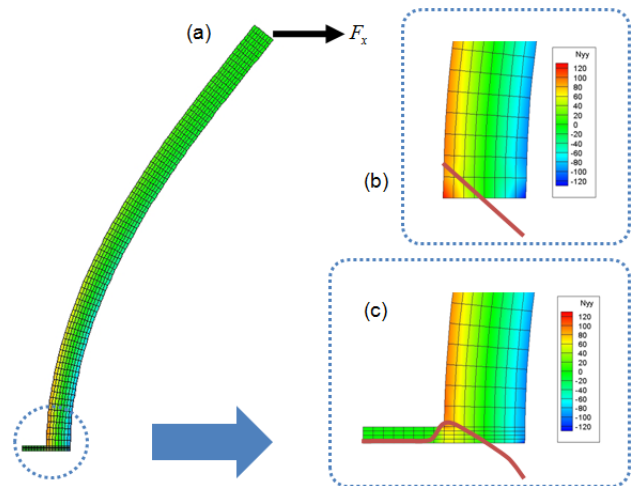


그림 4 A result of finite element analysis for seta structure with spatula tip pad (a) Deformed shape under the friction load. (b) stress contour of seta without spatula tip pad. (c) Stress contour of seta with spatula tip pad.

spatula의 두께에 따른 영향을 살펴보기 위하여, spatula의 길이를 100nm로 고정하고, 높이를 0에서 160nm까지 증가 시키가면서 접촉면에서의 응력분포를 관찰하였다. Spatula의 두께가 응접촉면에서의 응력분포에 미치는 영향을 알아보기 위해, 두께를 40nm로 고정하고 spatula의 길이를 0에서 80nm까지 증가시켜 가면서 접촉면에서의 응력을 계산하였다.

4. 유한요소 해석 결과

4.1 Spatula 효과

그림 4(a)는 spatula가 있는 경우 friction 하중 F_x 가 10nN이 가해졌을 때의 변형후 모습을 나타낸 그림이다. 아랫면에 지면에 접촉된 영역에 spatula 접착 패드가 있으며, 그림 4(c)는 이 부분을 확대하여 수직방향의 응력 σ_{yy} 의 윤곽선(stress contour)을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 적색 라인으로 표시된 것은 접촉면에서의 응력의 변화선(stress profile)을 표시한 것이다.

그림 4(b)는 spatula가 없는 경우 접촉면에서 응력을 나타낸 그림으로 응력의 변화선(stress profile)이 거의 직선으로 나타나며, 최대 인장 응력(maximum tensile stress)과 최대 압축 응력(maximum compressive stress)이 동시에 동일한 크기의 값을 가지며 좌우 양 끝단에서 발생함을 보여주고 있다. 반면에 spatula가 있는 경우 최대 압축 응력의 값은 spatula가 없는 경우와 비슷한 결과를 보여주지만, spatula가 있는 경우에는 최대 인장 응력의 크기가 크게 감소하고 있음을 그림 4(c)를 통해서 알 수 있다.

4.2 Spatula의 길이 및 두께에 따른 영향

Spatula의 길이 및 두께와 같은 기하학적 형상에 따른 영향을 알아보기 위해 spatula의 길이와 두께를 변화시켜 가면서 접촉면에서의 응력을 계산하였다.

그림 5(a)는 접촉면에서의 응력 변화선(stress profile)을 나타낸 그림으로 spatula의 길이를 100nm로 고정하고, spatula의 두께를 0에서 160nm까지 증가시켜 가면서 해석을 수행한 결과를 나타낸 그림이다. 그래프 안에 있는 두 개의 그림은 좌측에서부터 각각 spatula의 두께가 20nm, 80nm인 경우의 응력의 분포도(stress contour)를 나타낸 그림이다. Spatula의 두께가 0인 경우는 spatula 접착 패드가 없는

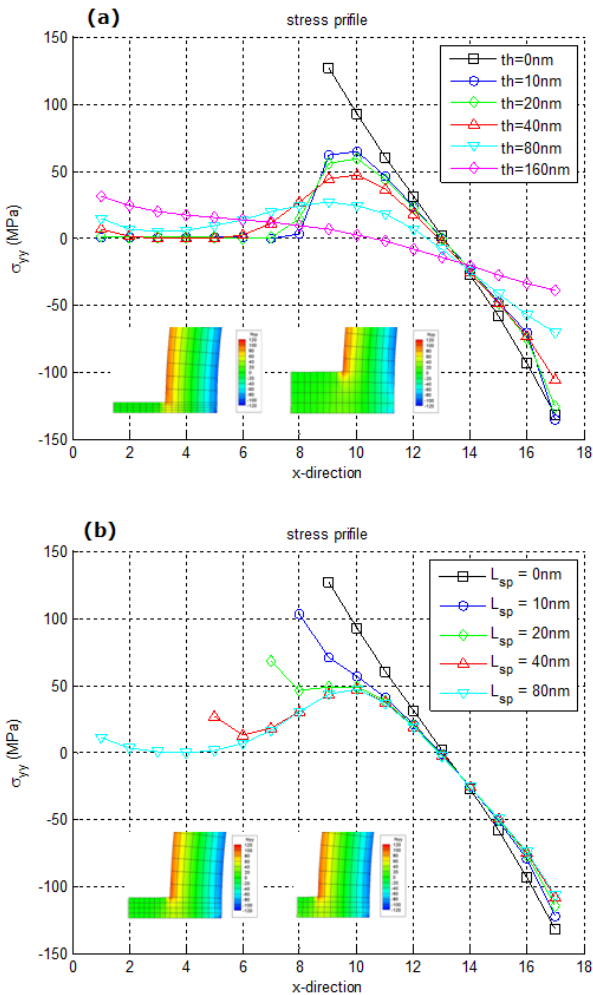


그림 5 Stress profiles of spatula tip pad. (a) Stress profiles of the contact region with respect to the change in spatula thickness. Spatula thicknesses of embedded stress contour plot are 20 nm and 80 nm, respectively. (b) Stress profiles of contact region with respect to the change in spatula length. Spatula lengths of the embedded stress contour plot are 80 nm and 40 nm, respectively.

경우로, 이 경우는 최대 인장 응력과 최대 압축 응력의 크기가 같으며, 거의 직선에 가까운 응력 변화선(stress profile)을 나타낸다. Spatula의 두께가 10nm인 경우, 최대 인장 응력이 거의 절반 정도로 감소한다. Spatula의 두께가 20nm, 40nm, 80nm로 점차적으로 증가함에 따라 최대 인장 응력은 점점 감소하다가 두께가 160nm가 되면 경계면에서의 응력 변화선(stress profile)의 형상이 거의 직선에 가까운 형상으로 바뀌는데, 이러한 현상은 spatula에 의한 영향이라기 보다는 보의 폭이 두꺼워져서 나타나는 현상이라고 볼 수 있다. 최대 압축 응력은 spatula의 두께가 10nm, 20nm와 같이 얇은 경우에는 거의 변화가 없지만, 두께가 40nm, 80nm와 같이 두꺼워지게 되면 감소하게 현상이 알 수 있다.

그림 5(b)는 spatula의 길이 변화에 따른 spatula 효과를 나타낸 그림으로 두께는 40nm로 고정하여 해석을 수행하였다. 길이가 0인 경우는 앞의 경우와 마찬가지로 응력의 변화선(stress profile)이 거의 직선을 나타낸다. Spatula의 길이가 10nm과 20nm로 증가하는 경우는 최대 인장 응력이 감소하면서 spatula의 맨 좌측에서 발생한다. Spatula의 길이가 40nm와 80nm로 더 증가하면 맨 좌측 끝에서의 응력은 계속 감소하지만 최대 인장 응력은 접촉면의 중앙부에서 발생한다. 중앙부에서의 인장 응력은 spatula의 길이가 20nm, 40nm, 80nm인 경우 모두 동일한 값을 가지며, 10nm인 경우에만 약간 더 높은 값을 가진다. 따라서 중앙부의 응력값은 spatula 두께의 변화에 대해서는 큰 영향을 받지만 spatula의 길이변화에 대해서는 거의 영향이 없음을 보여주고 있다. 최대 압축 응력은 spatula의 길이와 상관없이 접촉면의 맨 우측에서 발생하며, 길이가 증가하면 그 크기가 약간 감소하는 경향을 보인다.

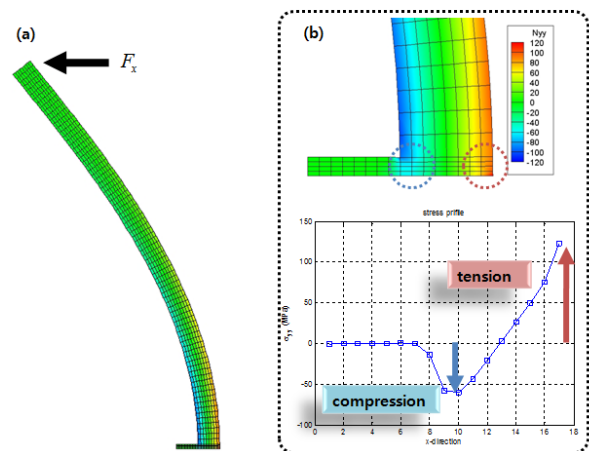


그림 6 A result of finite element analysis for seta structure with spatula tip pad under reverse friction load. (a) Deformed shape under the reverse friction load. (b) Stress contour and stress profile of contact region.

4.3 역방향 하중시 응력 분포

Seta에 역방향 하중이 가해지는 경우의 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 seta의 변형을 나타내며, 그림 6(b)는 접촉면에서의 응력 분포를 나타내는 그림이다. 하중의 방향이 바뀌에 따라 인장 응력과 압축 응력의 방향이 바뀌어 중앙부에서 압축 응력이 나타나고, 최대 인장 응력은 접촉면의 우측 끝에서 발생한다. 따라서 spatula가 있는 경우에는 역방향 하중하의 최대 인장 응력이 정방향 하중인 경우보다 크기 때문에, 역방향 하중시 쉽게 분리가 일어남을 알 수 있다.

5. 결 론

게코 접착 시스템은 보(beam)의 형상을 가지는 seta와 접착 패드 역할을 하는 spatula로 구성된다. 본 논문에서는 게코 접착 시스템의 접착 메커니즘의 해석을 위해 seta와 spatula로 구성되는 보 접착 모델(adhesive beam contact model)을 제시하였다. 보 접착 모델은 접촉면에서 불균일한 응력 분포를 가지는 특징이 있으며, 접촉면에서의 최대 인장 응력(tensile stress)에 의하여 접착/분리 메커니즘이 결정된다. 접촉면에서의 최대 인장 응력이 반데르발스 힘에 의한 접착력보다 작은 경우는 접착 상태가 유지되지만 외력에 의하여 접촉면에서의 최대 인장 응력이 반데르발스 힘보다 크면 분리가 발생하게 된다.

접착 패드 역할을 하는 spatula는 최대 인장 응력을 감소시키는 역할을 하며, spatula의 두께와 크기에 의한 영향을 받는다. 역방향 하중에 대해서는 spatula 효과에 의해 최대 압축 응력은 감소하지만 최대 인장 응력에는 영향을 미치지 못하기 때문에, 접착력과 분리력의 비대칭성이 발생한다. 이러한 원리로 강한 접착력을 가지는 게코 접착 시스템은 역방향 하중에 대하여 쉽게 분리가 가능하게 된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단이 주관하는 중견연구자지원사업(No. 2010-0018920)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Arzt, E., Gorb., S., Spolenak, R. (2003) From Micro to Nano Contacts in Biological Attachment Devices, *PNAS*, 100(19), pp.10603~10606.
- Rizzo, N.W., Gardner., K.H., Walls, D.J., Keiper-Hrynko, N.M., Ganzke, T.S., Hallahan, D.L. (2006) Characterization of the Structure and Composition of Gecko Adhesive Setae, *J. R. Soc. Interf.*, 3, pp.441~451.
- Autumn, K., Majidi, C., Groff, R.E., Dittmore, A., Fearing, R. (2006) Effective Elastic Modulus of Isolated Gecko Setal Arrays, *J. Exp. Biol.*, 209, pp.3558~3568.
- Autumn, K., Liang, Y.A., Hsieh, S.T., Zesh, W., Chan, W.P., Kenny, T.W., Fearing, R., Israelachvili, J., Full, R.J. (2000) Adhesive Force of a Single Gecko Foot-Hair, *Nature*, 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., Full, R.J. (2002) Evidence for Van Der Waals Adhesion in Gecko Setae, *PNAS*, 99(19), pp.12252~12256.
- Huber, G., Mantz, H., Spolenak, R., Mecke, K., Jacobs, K., Gorb, S.N., Arzt, E. (2005) Evidence for Capillarity Contributions to Gecko Adhesion from Single Spatula Nanomechanical Measurements, *PNAS*, 102(45), pp.16293~16296.
- Ge, L., Sethi, S., Ci, L., Ajayan, P.M., Dhinojwala, A. (2007) Carbon Nanotube-Based Synthetic Gecko Tapes, *PNAS*, 104(26), pp.10792~10795.
- Qu, L., Dai, L., Stone, M., Xia, Z., Wang, Z.L. (2008) Carbon Nanotube Arrays with Strong Shear Binding-On and Easy Normal Lifting-Off, *Science*, 322, pp.238~242.
- Jeong, H.E., Lee, J.K., Kim, H.N., Moon, S.H., Suh, G.Y. (2009) A Nontransferring Dry Adhesive with Hierarchical Polymer Nanohairs, *PNAS*, 106(14), pp.5639~544.
- Jeong, H.E., Suh, K.Y. (2009) Nanohairs and Noatubes: Efficient Structural Elements for Gecko-Inspired Artificial Dry Adhesives, *Nano Today*, 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.
- Kendall, K. (1975) Thin-Film Peeling-The Elastic Term, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 8, pp.1449~1452.
- Israelachvili, J.N. (1992) *Intermolecular and Surface Forces*, Academic Press, New York, p.450.

- 논문접수일 2010년 7월 9일
- 논문심사일
 - 1차 2010년 7월 13일
 - 2차 2010년 7월 30일
- 게재확정일 2010년 7월 31일