

도마뱀 발붙이 모사 다층 응착시스템 해석 Analysis of Multi-Layer Adhesive System like Gecko Feet

*#김태완¹

*#T. W. Kim(tw0826@pknu.ac.kr)¹

¹부경대학교 기계공학과

Key words : Gecko Feet, Adhesion, Biomimetic Adhesive System

1. 서론

최근 자연의 생명체의 원리를 모방 또는 응용하여 공학적으로 활용하고자 하는 자연모사공학에 관한 연구가 활발하다. 그 중에서 곤충류나 거미류, 파충류 등의 생명체들은 그들만의 독특한 응착시스템을 이용하여 벽이나 천장에 매달리거나 이동할 수 있는 능력을 가지고 있다. 그 중에서도 도마뱀 발붙이는 가장 진화한 응착 시스템으로 알려져 있다. 도마뱀 발은 *setae*, *branches*, *spatulae*로 이어지는 3층 구조로 구성되어 있으며 각 층은 수많은 섬모들로 이루어져 있다. 도마뱀 발붙이의 놀라운 응착 능력은 다층 구조의 응착 강화 효과로도 설명될 수 있다. 다층 구조의 섬모들은 다양한 거친 표면에 대한 적합성을 높여 많은 수의 섬모들이 표면과 직접 접촉함으로써 높은 응착력을 발휘할 수 있게 한다. 도마뱀 발붙이의 특성과 관련하여 섬모 구조의 응착 시스템의 제작과 관련된 실험적 연구는 많이 진행되어 왔으나 응착 시스템의 설계에 대한 해석적 연구는 상대적으로 미흡하다.

본 연구에서는 생체모방 응착 시스템의 설계 가이드로 활용하기 위해 *adhesion design map*을 구축하고자 하였다. 높은 응착력과 내구성을 만족하는 *fiber* 형상을 최적화하기 위해 3가지의 구조조건을 만족하면서 섬모의 재질, 작동하중 및 접촉하는 표면의 거칠기 정보가 주어졌을 때 원하는 응착 성능을 발휘할 수 있는 최적의 섬모 형상을 설계할 수 있는 *design map*을 개발하였다.

2. 해석방법

본 연구에서는 거친 표면과 접촉하는 다층 응착 시스템과 2층 응착시스템을 Fig. 1과 같이 탄성 스프링으로 모델링 하였다. 각 섬모는 원형 단면의 캔틸레버 빔으로 섬모에 끝에는 구형의 팁이 표면과 θ 만큼 기울어져 접촉하고 있는 것으로 가정하

였다. 구형 팁과 평판간의 접촉시 발생하는 응착력은 JKR이론[1]에 의해 계산하였다. 계산된 단일 팁의 응착력은 스프링 시스템의 탈착시 임계값으로 활용된다. 높은 응착력과 내구성을 만족하는 *fiber* 형상을 최적화하기 위해 3가지의 구조조건을 적용하였다. 첫번째는 *Non-buckling* 조건으로서 섬모의 *micro-buckling*이 발생하지 않는 설계를 위해 *Euler buckling* 이론에 근거하였고, 두 번째는 *Non-fracture* 조건으로서 섬모의 탈착시 팁의 응착력을 견딜 수 있는 섬모의 강도 설계를 위해 *Spolenak et al.*[2]이 제시한 섬모 파손 한계식을 이용하였으며, 세 번째는 *Non-sticking* 조건으로서 섬모들끼리의 상호 응착을 방지하기 위해 섬모들간의 간격에 대한 한계치를 팁끼리 작용하는 응착력섬모의 굽힘 방향의 탄성력의 관계를 통해 유도하였다.[3] 응착 시스템과 접촉하는 거친 표면은 자기 상관함수와 확률 밀도 함수의 조합을 통해 수치적으로 표면을 생성하였다.

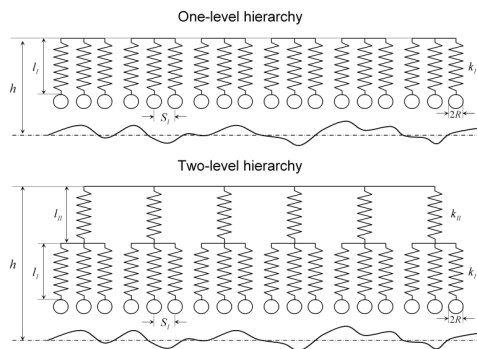


Fig. 1 One- and two-level spring models contacting with a rough surface.

3. 해석결과 및 토의

Fig. 2는 도마뱀 몸무게로부터 해석 영역에 해당

되는 $P_n=2kPa$ 의 부가압력에서 단층 및 2층 응착시스템이 $\sigma=1\mu m$ 인 거친 표면과 접촉시 발생하는 스프링력의 변화를 도기한 것이다. 그림에서 보인 바와 같이 단층 시스템의 응착력은 약 $4.2\mu N$ 으로 adhesion coefficient가 2.33정도임을 알 수 있다. 여기서 adhesion coefficient는 부가하중 F_n 에 대한 시스템의 응착력 F_{ad} 의 비로써 응착시스템의 응착강도의 의미로 해석될 수 있다. 2-level 응착시스템의 adhesion coefficient는 약 3.78로서 다층구조에 의한 응착강화 효과를 확인 할 수 있다. Fig. 3은 응착시스템이 작동되는 조건인 부가하중, 접촉 표면의 거칠기, 점모의 재질 그리고 원하는 adhesion coefficient가 주어졌을 때 최적의 점모의 반경 및 세장비를 도출할 수 있는 adhesion design map을 도기한 것이다. 점모 팁의 반경이 $0.1\mu m$, level I과 level II간의 점모 개수의 비가 10:1이라 가정하고 점모의 탄성계수 $E=100MPa$ 인 2층 응착시스템의 adhesion design map을 도기한 것이다. CASE STUDY로 다음의 조건을 만족하는 벽을 타고 오르는 응착시스템의 최적화된 점모의 크기를 결정하고자 한다.

- ① material: polymer with $E\approx 100MPa$
- ② applied pressure by weight $< 10kPa$
- ③ adhesion coefficient > 5
- ④ surface roughness $\sigma < 1\mu m$

Fig. 3으로부터 2층 응착 시스템을 적용한다면 level II의 세장비가 5인 경우 level I의 점모는 세장비 1의 반경 $2.8\mu m$ 의 최적화된 점모 설계치를 얻을 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 생체모방 응착 시스템의 설계 가이드로 활용하기 위해 adhesion design map을 구축하고자 하였다. 이에 앞서 거친 표면과 접촉하는 단층 및 다층 구조의 응착시스템에 대한 응착력을 시뮬레이션하여 다층 구조의 응착강화효과를 확인하였다. 응착 점모 형상을 최적화하기 위해 Non-buckling, Non-fracture, Non-sticking의 3가지 구속조건을 만족하면서 점모의 재질, 작동하중 및 접촉하는 표면의 거칠기 정보가 주어졌을 때 원하는 응착성능을 발휘할 수 있는 최적의 점모 형상을 설계할 수 있는 design map을 개발하였다. 이러한 adhesion design map을 활용하면 생체모방 응착시스템의 제작시 주어진 조건에 맞는 최적화된 점모의 형상을 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

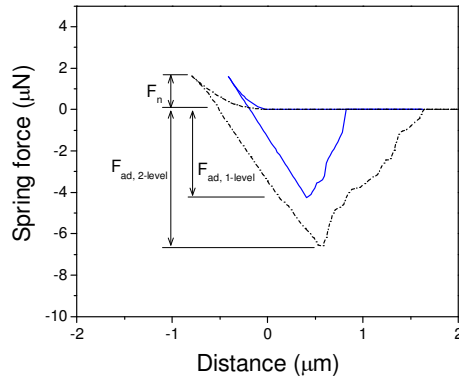


Fig. 2 Spring force-distance curves for one- and two-level spring models with rough surface ($\sigma=1\mu m$)

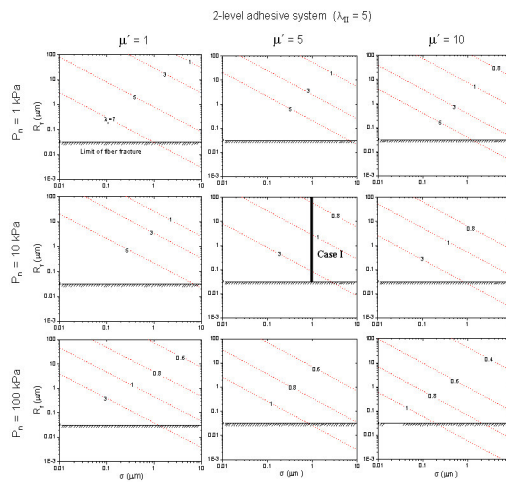


Fig. 3 Adhesion design map for 2-level adhesive systems (aspect ratio $\lambda_{II} = 5$)

참고문헌

1. Johnson, K. L., Kendall, K. and Roberts, A. D., "Surface energy and the contact of elastic solids," Proc. R. Soc. Lond. A., **324**, 301-313, 1971.
2. Spolenak, R., Gorb, S. and Arzt, E., "Adhesion design maps for bio-inspired attachment systems," Acta Biomaterialia, **1**, 5-13, 2005.
3. Kim, T. W. and Bhushan, B., "Optimization of Biomimetic Attachment system contacting with Rough Surface," Journal of Vacuum Sci. Technol. A, **25**, 1003-1012, 2007.