

다양한 표면 상태에 따른 달팽이의 점착력 측정에 관한 연구

Measurement of Snail Adhesion Force on Various Surface Conditions

*김광일¹, 김영배¹, 김대은²

*K. I. Kim¹, Y. T. Kim¹, #D. E. Kim(kimde@yonsei.ac.kr)²
 연세대학교 기계공학과 대학원¹, 연세대학교 기계공학부²

Key words : Snail, Mucus, Adhesion force, Suction force

1. 서론

최근 달팽이(snail), 조개(clam) 그리고 문어(octopus)와 같은 다양한 연체동물들이 가지고 있는 점착 메커니즘(adhesion mechanism)에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 이러한 동물들이 가지고 있는 점착 메커니즘은 다양한 어플리케이션에 활용될 수 있을 뿐만 아니라 인간의 일을 대체할 수 있는 많은 로봇 시스템에 이용될 수 있을 것으로 전망하고 있다 [1~6].

일반적으로 알려진 달팽이는 나선형 모양의 석회질 껍질과 머리와 넓고 평평한 근육성 발을 가진 연체동물문(mollusca)에 속하는 복족류(gastropoda)의 일종이다. 달팽이의 발에서는 점액선(mucous gland)에 의해 끈끈한 점액(mucus)이 분비되는데 달팽이는 이 점액을 이용해 이동하거나 각종 박테리아나 불순물들이 몸에 쌓이는 것을 막는다. 또한 외부의 강한 자극으로부터 살아남기 위해 강한 점착력(adhesion force)을 발생하기도 한다 [7~10].

본 연구에서는 살아있는 달팽이를 대상으로 하여 다양한 표면 상태에 따른 달팽이의 점착력을 pull-off force와 lateral force를 측정하여 고찰하고자 하였다. 다양한 표면 상태는 표면에너지(surface energy), 표면조도(surface roughness), 물과 오일층과 같은 인자 등을 변화하여 구현하였다. 또한, 실험을 통해 달팽이의 발 중앙 하단부의 압력을 측정하여 suction force를 구하고 그 점착 메커니즘에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험 시편과 방법

본 연구에서는 국내에서 서식하고 있는 *Helix pomatixa* 종을 이용하였으며 달팽이의 평균 무게와 발(foot)의 평균 면적은 약 43 g, 20 cm²이다. 동일한 달팽이를 이용하여 반복 실험 할 경우 여러 외부 환경에 따라 큰 실험 오차가 발생할 수 있다. 이를 최소화하기 위해 실험기간 동안 일정한 시간에 달팽이에 먹이를 공급하고 달팽이가 지치지 않도록 달팽이의 실험 군집을 2개조로 나누어 교대로 실험을 수행하였다. 또한 생체 사이클의 변화를 최대한 줄이기 위해 실험 시간을 매번 동일한 시간 때로 유지하였다.

Table 1은 표면에너지(surface energy)와 표면조도(surface roughness)에 따른 달팽이의 점착력을 측정하기 위해 사용한 시편 표면의 파라미터이다. 표면에너지를 제어하기 위해 유리표면(parameter A)과 PDMS표면(parameter B)를 사용하였으며 그 상대적인 차이는 DI water와의 접촉각 결과를 이용하여 비교하였다. 한편, 표면조도는 실리콘 카바이드(silicon carbide) 평균입자지름(average particle diameter)의 크기가 서로 다른 sand paper를 사용하여 제어하였다.

Table 1 Parameter of experimental data for surface properties

Parameter	A	B
Surface energy (contact angle)	32 °	118 °
Surface roughness (average particle diameter)	35 μ m	425 μ m

달팽이의 점착력을 측정하기 위한 실험 장치는 Fig. 1에 나타나 있다. 실험 장치는 아크릴 벤치(acrylic bench), force gage, 압력센서, CCD 카메라 그리고 유리거울(mirror)을 사용하여 구성하였다. 실험 방법은 달팽이의 껍질에 힘(force)을 측정할 수 있도록 알루미늄 지그(aluminum jig)를 제작하여 고정시킨 후 force gage

를 사용하여 수직방향의 pull-off force와 수평방향의 lateral force를 측정하였으며 동시에 CCD 카메라와 각도조절이 가능한 유리거울을 사용하여 달팽이의 발 중앙 하단부의 표면형상 변화를 이미지로 측정하였다. 또한 압력센서를 이용하여 pull-off force 측정 시 발생하는 suction force를 측정하였다.

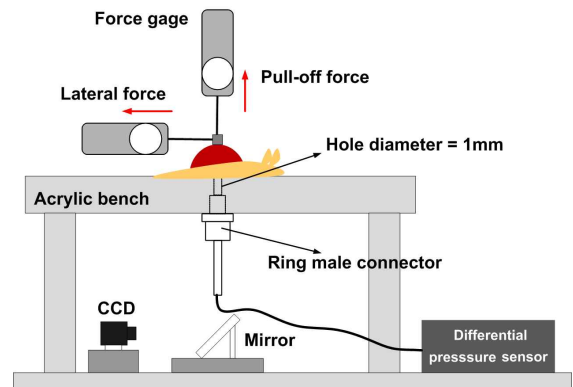


Fig. 1 Schematic of experimental setup for adhesion force of snail

3. 실험 결과 및 논의

Fig. 2는 표면에너지와 표면조도에 따른 달팽이의 수직방향의 pull-off force 측정 결과를 보여준다. 달팽이의 pull-off force는 표면에너지보다는 표면조도가 커질수록, 즉 표면이 거칠수록 작아진다는 것을 알 수 있다.

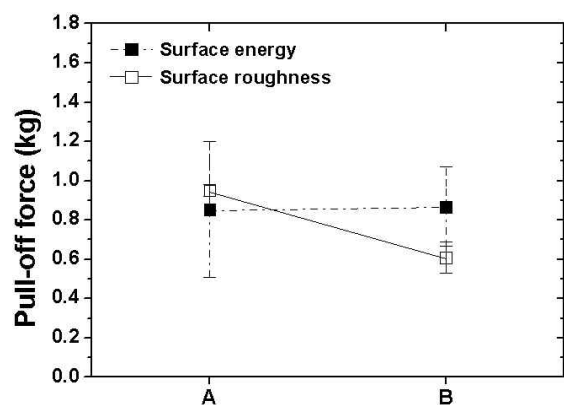


Fig. 2 Pull-off force of snail for changing surface energy and surface roughness

Fig. 3은 표면 상태에 따른 달팽이의 pull-off force와 lateral force를 측정한 그래프이다. 측정된 pull-off force는 건조한 아크릴 표면에서 보다 물에 젖은 표면과 오일이 형성된 표면에서 작아졌다. 이는 달팽이의 점착력이 표면의 물과 오일에 의해 그 점액의 결합력이 약해졌다는 것을 의미한다. lateral force의 경우 3가지 조건에서 모두 비슷한 수치를 나타냈으며 이는 lateral force가 점액에 의해 형성된 점착력이라기보다는 다른 메커니즘에 의해 형성된 힘에 의해 영향을 받기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 표면 상태에 따른 달팽이의 점착력을 pull-off force와 lateral force를 통해 측정하였다. 동시에 달팽이의 발 중앙 하단부의 suction force를 측정하여 달팽이가 가지고 있는 점착 메커니즘을 알아보았으며 그 내용은 다음과 같다.

1) 달팽이의 점착력의 세기는 표면에너지의 차이보다는 표면 조도에 의한 영향을 많이 받는다. 그 이유는 달팽이의 점착력이 suction force의 영향을 받기 때문이다.

2) 물과 오일층이 형성된 표면에서 pull-off force는 lateral force에 비해 영향을 많이 받으며 이는 adhesion force에 영향을 받기 때문이다.

3) 달팽이의 pull-off test 시 점착현상은 adhesion force가 작용하는 단계, adhesion force와 suction force가 같이 작용하는 단계, 달팽이가 표면에서 떨어지는 단계로 총 3단계로 나누어 볼 수 있다.

후기

본 연구는 산업자원부 21세기 프론티어 기술개발사업인 지능형마이크로시스템개발사업(<http://www.microsystem.re.kr>)의 연구비 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

- Smith, A. M., "The Role of Suction in the Adhesion of Limpet", J. exp. Biol, 161, 151-169, 1991.
- William, M. K., Smith, A. M., "The Structure and Adhesive Mechanism of Octopus Suckers", Inter. Comp. Biol, 42, 1146-1153, 2002.
- Chan, B., Balmforth, N. J. and Hosoi, A. E., "Building a Better Snail: Lubrication and Adhesive Locomotion", Phys. Fluids, 17, 113101, 2005.
- Dodou, D., Girard, D., Breedveld, P. and Wieringa, P. A., "Intestinal Locomotion by Means of Mucoadhesive Films", ICAR'05 Proceeding, 12th, 2005.
- Dodou, D., Girard, D., Breedveld, P. and Wieringa, P. A., "Mucoadhesives in the Gastrointestinal Tract: Revisiting the Literature for Novel Applications", European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 60, 1-16, 2005.
- Shi, Y., Yu, Z., Kong, L., Hsu, H.Y., "The Locomotion Systems for Self-propelled Endoscope: A Review and A New Proposal", Proceedings of the Fifth IASTED International Conference, February 14-16, 2007.
- Denny, M. W., Gosline, J. M., "The Physical Properties of the Pedal Mucus of the Terrestrial Slug, *Ariolimax columbianus*", J. Exp. Biol, 88, 375-393, 1980.
- Lee, K. T., Choi, J. H., Park, H. J., Lim, S. C., "Antioxidative Activity of the Mucin obtained from *Achatina fulica* and Its Commercially-Additive Preparation" Bull. K.H. Pharma. Sci, 27, 89-94, 1999.
- Smith, A. M., Quick, T. J., Peter, R. L., "Differences in the Composition of Adhesive and Non-adhesive Mucus from the Limpet *Lottia limatula*", Biol. Bull, 196, 34-44, 1999.
- Smith, A. M., Morin, M. C., "Biochemical Differences between Trail Mucus and Adhesive Mucus from Marsh Periwinkle Snails", Biol. Bull, 203, 338-346, 2002.

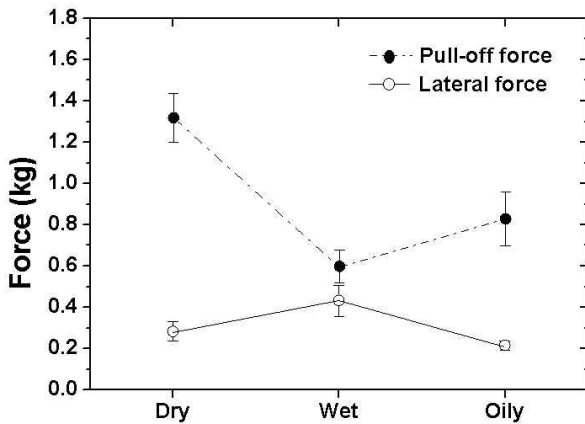


Fig. 3 Pull-off force and lateral force of snail on various surface conditions

Fig. 4는 달팽이가 가지고 있는 점착력에 영향을 미치는 힘들을 나타낸 것이다. 측정된 pull-off force를 달팽이의 전체 점착력이라고 본다면 달팽이의 점착력은 달팽이의 발과 시편 표면사이에 발생하는 adhesion force와 달팽이의 발 중앙 하단부에서 발생하는 suction force로 나누어 볼 수 있다. 여기서 suction force는 식(1)에 의해 계산되었으며 진공압력 P는 압력센서를 통해 측정된 압력이다.

$$F_{suction} = \frac{P \times A}{760} \quad (1)$$

여기서,
 P : 진공압력(mmHg)
 A : 흡착이 일어나는 달팽이의 발 면적(cm²)

$$F_{adhesion} = F_{pull-off} - F_{suction} \quad (2)$$

그리고 adhesion force는 식(2)에 의해 계산되었다. Fig. 5처럼 달팽이의 점착력이 형성되는 초기 단계에서는 suction force가 발생하지 않으며 단지 adhesion force에 의해서 달팽이가 시편 표면에 점착해 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 측정된 pull-off force가 증가함에 따라 suction force가 서서히 발생하게 되며 달팽이가 실험 표면과 떨어질 시점에서 최대가 된다. 그러나 suction force가 최대가 된 시점에서의 힘은 adhesion force에 비해 작게 나타났다.

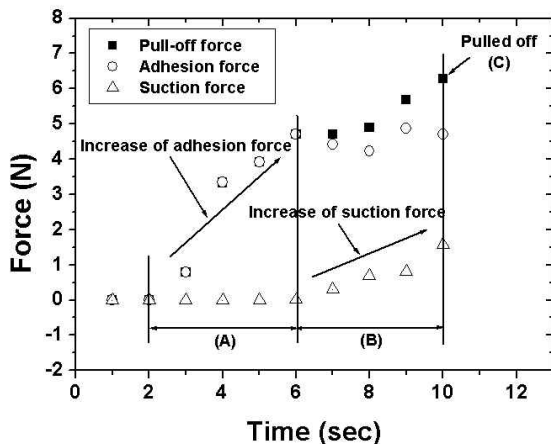


Fig. 4 Force-time curve for adhesion force of snail