

건식 접착 구조물의 금속 코팅 두께에 따른 접착강도 변화[§]

김규혜* · 권다솜* · 김미정* · 김수희* · 윤지원* · 안태창* · 황희운**

* 국립안동대학교 기계설계공학과

Adhesive Strength of dry Adhesive Structures Depending on the Thickness of Metal Coating

Gyu Hye Kim*, Da Som Kwon*, Mi Jung Kim*, Su Hee Kim*, Ji Won Yoon*,
Tea Chang An* and Hui Yun Hwang**

* Dept. of Mechanical Design Engineering, Andong Nat'l Univ.

(Received April 12, 2016 ; Revised May 16, 2016 ; Accepted May 30, 2016)

Key Words: Gecko-like Microstructures(게코 모방 미소구조), Metal Coating(금속코팅), Adhesion(접착)

초록: 최근, 자연 모사를 이용한 연구가 활발히 진행되어 지고 있다. 그 중에서도 높은 접착력으로 인해 이동이 자유로운 도마뱀붙이가 각광받고 있다. 도마뱀붙이는 발바닥 표피에 계층적 구조를 가지고 있고, 이러한 구조로 인하여 높은 접착력을 가진다. 본 연구에서는 건식 접착 구조물에 금속 코팅 두께에 따른 접착강도 변화에 대한 연구를 수행하였다. 건식 접착 구조물 제작을 위한 마이크로 몰드를 포토 리소그래피로 제작한 후, 고분자 폴리머인 PDMS를 사용하여 건식 접착 구조물을 제작하였다. 제작된 건식 접착 구조물의 금속 코팅은 플라즈마 스퍼터링을 사용하였다. 건식 접착 구조물의 접착력 실험은 Pure shear test방법을 통하여 평가하였다. 건식 접착 구조물에 인듐, 아연, 금을 코팅하였을 때 각각 4 nm, 8 nm 및 6 nm의 두께를 가질 때 접착 강도가 가장 우수한 결과를 보였다.

Abstract: Recently, engineering applications have started to adopt solutions inspired by nature. The peculiar adhesive properties of gecko skin are an example, as they allow the animal to move freely on vertical walls and even on ceilings. The high adhesive forces between gecko feet and walls are due to the hierarchical microscopical structure of the skin. In this study, the effect of metal coatings on the adhesive strength of synthetic, hierarchically structured, dry adhesives was investigated. Synthetic dry adhesives were fabricated using PDMS micro-molds prepared by photolithography. Metal coatings on synthetic dry adhesives were formed by plasma sputtering. Adhesive strength was measured by pure shear tests. The highest adhesion strengths were found with coatings composed of 4 nm thick layers of Indium, 8 nm thick layers of Zinc and 6 nm thick layers of Gold, respectively.

1. 서 론

자연모사는 공학 분야의 발전에 새로운 길을 제시하고 있다. 도마뱀(Gecko) 발바닥의 계층적 구조를 모방한 건식 접착 구조는 대표적인 분야

중 하나이다. 도마뱀 발바닥은 마이크로 단위의 강모 위에 나노 단위의 섬모로 구성 되어져 있다. 섬모는 주걱 형상을 하고 있다. 도마뱀 발바닥 계층 구조는 β -Keratin로 구성되어 있다. 도마뱀의 높은 접착력은 발바닥과 대상면 사이의 반데르발스 힘에 의한 것이다.^(1,2) 이러한 도마뱀의 접착시스템은 접착 시스템의 새로운 개념을 제시하고 있다. 이러한 도마뱀 발바닥 특성을 이용하여 로봇이나 건식 접착제를 개발하는 연구들이

§ 이 논문은 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회 (2015. 11. 10-14., ICC제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, hyhwang@andong.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Specifications of Polydimethylsiloxane

| Property | Unit | Value |
|-----------------------|---------|-------|
| Viscosity (Part A) | cP | 5175 |
| | mPa-sec | 5175 |
| | Pa-sec | 5.2 |
| Viscosity (Mixed) | cP | 3500 |
| | mPa-sec | 3500 |
| | Pa-sec | 3.5 |
| Specific Gravity | Uncured | 1.03 |
| Specific Gravity | Cured | 1.04 |
| Working Time at 25°C | hr | 1.4 |
| Cure Time at 25°C | hrs | 48 |
| Cure Time@ 100°C | min | 35 |

진행되어 지고 있다. 하지만, 도마뱀 발바닥을 모방한 건식 접착 구조물의 제작 재료로 높은 접착 강도를 가지는 고분자 재료를 많이 사용하게 된다. 고분자 재료로 구조물을 제작하게 되면 반복 사용 시 구조물의 마모와 탈락이 생기게 된다. 이러한 건식 접착 구조물의 마모와 탈락이 생기는 것을 방지하기 위해 건식 접착 구조물의 금속 코팅을 하였다. 이때, 금속 종류와 두께에 따라 접착 강도 변화에 대한 연구를 진행하였다.

2. 시험편 제작

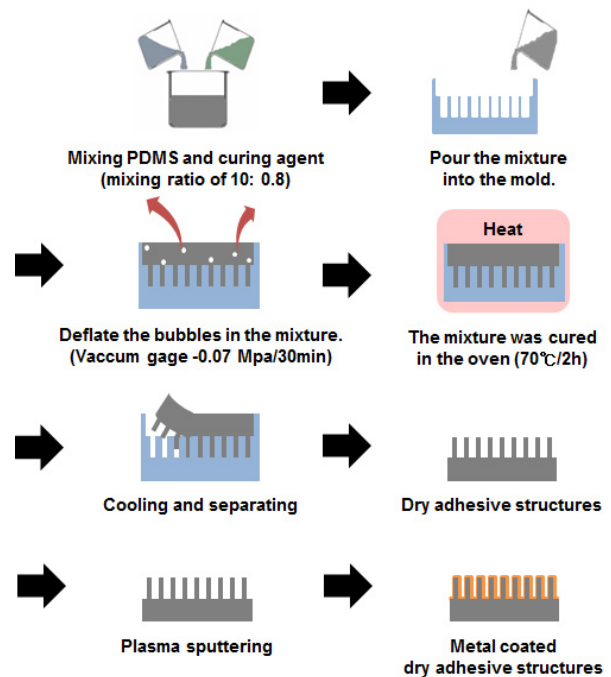
시험편 제작 재료는 PDMS(SYLGARD 184 Kit, Dow Corning Co., Ltd., USA)를 사용하였다. 재료에 대한 정보는 Table 1에 제시하였다. 시험편 제작 과정은 Fig. 1과 같이 진행되었다. Fig. 1과 같이 주제와 경화제를 10:0.8의 비율로 혼합한 후, 혼합물을 시험편 제작 몰드에 주입한다. 혼합물의 기포를 탈포한 후에 오븐(VO-64, Hanyang Scientific Equipment Co., Ltd., Korea)에서 80도로 3시간 경화하여 시험편을 제작한다. 건식 접착 구조물의 금속 코팅 두께에 따른 접착강도 변화를 보기 위해 건식 접착 구조물에 금속코팅을 하였다. 시험편에 금속을 코팅하기 위해서 Compact plasma sputtering coater(GSL-1100X-SPC12-LD, MTI Korea, Korea)을 사용하였다. 금(Au), 인듐(In), 아연(Zn)을 코팅 재료로 사용하였다. Table 2에 사용된 금속의 표면에너지, 강도 및 강성을 표기하였다. 금속 코팅 조건은 Table 3에 표시하였으며, 코팅 두께가 2 nm~10 nm가 되도록 진행하였다. 금속 코팅 두께를 구하는 식은 아래와

Table 2 Specifications of coated metals

| | Surface energy (J/m ²) | Strength (MPa) | Stiffness (GPa) | Purity (%) |
|--------|------------------------------------|----------------|-----------------|------------|
| Gold | 0.611 | 102 | 77 | 99.99 |
| Zinc | 0.385 | 37 | 96.5 | |
| Indium | 0.342 | 4.5 | 12.7 | |

Table 3 Sputtering conditions of coated metal

| | K | I(mA) | Time(s) | D(nm) |
|----|------|-------|---------|-------|
| Zn | 0.11 | 10 | 0~100 | 2~10 |
| In | 0.17 | 10 | | |
| Au | 0.10 | 10 | | |

**Fig. 1** Fabricating procedure of dry adhesive structures

같다.

$$D = KIT$$

식에서 D는 코팅 금속 두께(nm), K는 금속 재료의 재료상수, I는 Plasma sputtering current(mA), T는 시간(s)을 나타낸다.

3. 실험 방법

3.1 접촉각 측정 방법

표면 에너지 실험은 접촉각을 측정하는 실험으로 실험방법은 Fig. 2와 같다. 구조물이 없는 시

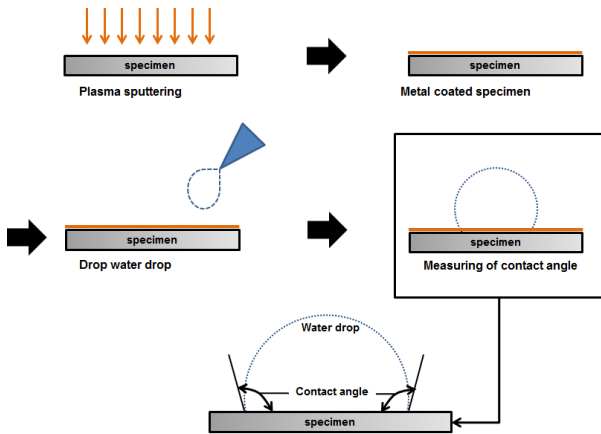


Fig. 2 Measuring principle of contact angle

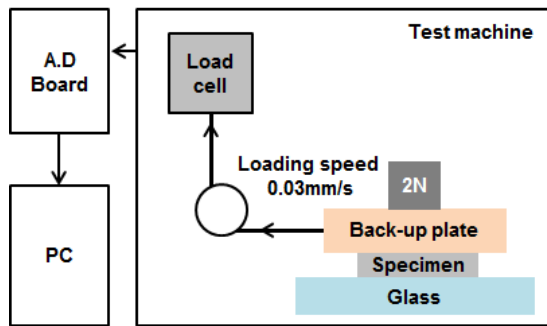


Fig. 3 Schematic configuration of pure shear tests

험편에 코팅 금속 두께를 달리하여 코팅을 하였다. 코팅된 시험편에 피펫을 이용하여 물방울을 놓고 카메라를 이용하여 관찰하고, Image J 프로그램을 이용하여 표면과 물방울 사이의 접촉각을 측정한다. 이때 물방울의 왼쪽과 오른쪽에서 2개의 각도를 얻을 수 있으며, 2개의 각도의 평균을 시험편의 접촉각으로 정의하였다. 접촉각을 이용하여 인듐, 아연, 금의 코팅두께에 따른 접촉각 변화를 관찰하였다.

3.2 접착강도 실험 방법

건식 접착 구조물의 접착력 시험방법은 Pull-off test,^(3,4) Pure shear test,^(5,6) Peeling test⁽⁷⁾ 방법이 있다. 제작한 건식 접착 구조물은 계층구조가 아니며, 구조물의 각도가 없는 단순한 형태의 구조물이기 때문에 이에 적합한 Pure shear test를 사용하였다. Fig. 3에서 시험편을 Back-up plate에 고정된 후에 Glass 위에 올린다. 이때, Back-up plate 위에 2N의 하중을 인가한다. 2N의 하중을 인가 후에 시험편의 수평방향으로 0.03 mm/s의 속도로 당긴다. 시험편의 이동거리에 따라 하중이 증가

하였다가 감소할 때까지 진행하였다. 시험편에 가해지는 하중의 변화는 로드셀(DBCM, Bongshin, Korea.)로 측정하였고, 측정된 하중 데이터는 Signal Express(National Instruments Co., USA)를 이용하였다.

4. 실험 결과

Fig. 4(a-c)는 금속 코팅한 건식 접착 구조물의 접촉각 및 접착력 실험결과이다. 시험편에 금속의 코팅두께를 다르게 하여 진행하였다. 시험편에 형성되는 금속 코팅 두께는 2 nm~10 nm가 되도록 코팅하였다. 건식 접착 구조물에 인듐으로 코팅한 시험편의 결과는 Fig. 4(a)에 나타났다.

건식 접착 구조물에 인듐으로 코팅한 시험편의 접착강도 변화를 살펴보면, 코팅 두께가 2 nm일 경우 3.90 kPa, 코팅 두께가 4 nm일 때는 10.91 kPa, 코팅 두께가 6 nm일 때는 6.89 kPa, 코팅두께가 8 nm일 때는 5.01 kPa, 코팅두께가 10 nm일 때는 4.51 kPa의 접착강도를 가졌다. 인듐의 박막두께가 2 nm일 때는 접촉각은 138.8°, 4 nm일 때는 129.0°, 6 nm일 때는 130.3°, 8 nm일 때는 131.0°, 10nm일 때는 134.5°이다. 접촉각이 작을수록 접착강도가 높았다. 건식 접착 구조물에 인듐으로 코팅한 시험편의 경우에 10.91 kPa로 코팅두께가 4nm일 때 높은 접착강도를 가졌다. 건식 접착 구조물에 아연으로 코팅한 시험편의 결과는 Fig. 4(b)에 나타났다. 아연으로 코팅한 건식 접착 구조물의 접착강도 변화를 보면, 아연 코팅 두께가 2 nm일 경우 5.46 kPa, 코팅 두께가 4 nm일 때는 7.73 kPa, 코팅 두께가 6 nm일 때는 8.71 kPa, 코팅 두께가 8 nm일 때는 9.57 kPa, 코팅 두께가 10 nm일 때는 8.49 kPa의 접착강도를 가졌다. 건식 접착 구조물의 아연 코팅두께가 2 nm일 때는 접촉각은 134.5°, 4 nm일 때는 133.3°, 6 nm일 때는 130.4°, 8 nm일 때는 125.0°, 10 nm일 때는 135.6°이다. 접촉각이 작을수록 접착강도가 높았다. 아연의 코팅두께가 8 nm일 때 9.57 kPa로 높은 접착강도를 가진다. 건식 접착 구조물에 금으로 코팅한 시험편의 결과는 Fig. 4(c)에 나타났다. 금으로 코팅한 건식 접착 구조물의 접착강도 변화를 보면, 금 코팅 두께가 2 nm일 경우 4.95 kPa, 코팅 두께가 4 nm일 때는 5.59 kPa, 코팅 두께가 6 nm일 때는 6.33 kPa, 코팅 두께가 8 nm일 때는 4.73 kPa, 코팅 두께가 10 nm일 때는 3.58 kPa의 접착

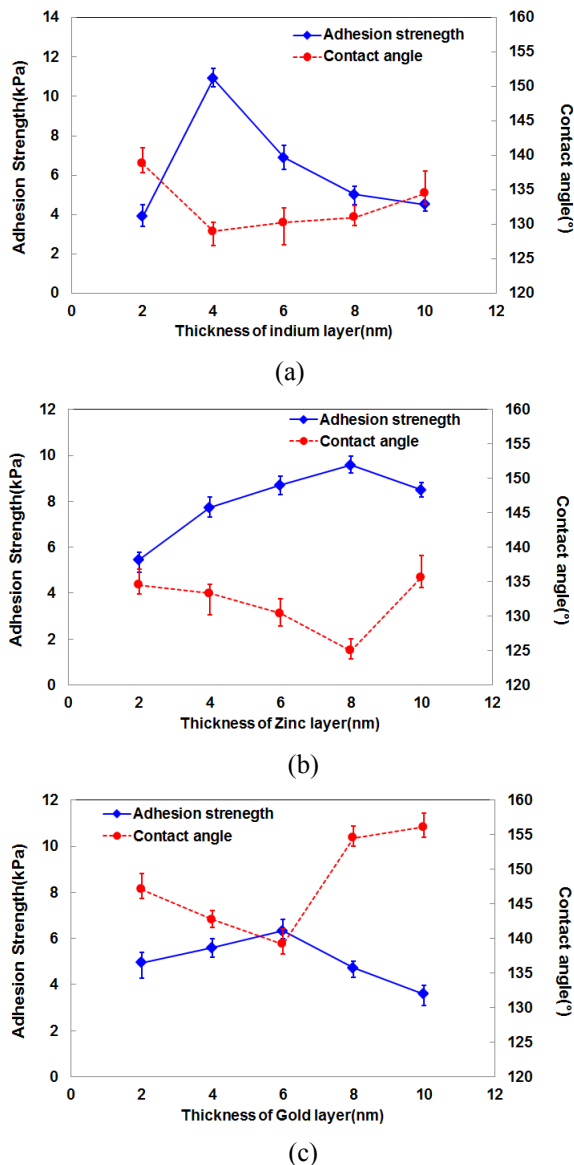


Fig. 4 Adhesion strength with respect to material and thickness of coating metals

강도를 가졌다. 금의 코팅 두께가 2 nm일 때는 접촉각은 147.1°, 코팅 두께가 4 nm일 때는 142.7°, 코팅 두께가 6 nm일 때는 139.2°, 코팅 두께가 8 nm일 때는 154.5°, 코팅 두께가 10 nm일 때는 156.1°이다. 접촉각이 작을수록 접착강도가 높았다. 금의 코팅 두께가 6 nm일 때 6.33 kPa로 높은 접착강도를 가진다. Fig. 4(a-c)를 보면 건식 접착 구조물에 인듐 코팅 두께가 4 nm일 때에 접착강도는 10.91 kPa로, 접촉각은 129.0°였고, 아연 코팅 두께가 8 nm일 때에 접착강도는 9.57 kPa로 접촉각은 125.0°였다. 금 코팅 두께가 6 nm일 때에 접착강도는 6.33 kPa로, 접촉각은 139.2°를 가

졌다. 인듐과 아연으로 코팅을 하였을 때 접착강도가 높은 이유는 금으로 코팅하였을 때보다 코팅 금속 자체의 표면에너지가 낮기 때문이다. 결과적으로 인듐, 아연, 금으로 코팅한 건식 접착 구조물 중에서 인듐과 아연으로 코팅한 건식 접착 구조물은 가장 높은 접착강도를 가졌고, 건식 접착 구조물에 인듐으로 4 nm 코팅하였을 때에 가장 높은 접착강도를 가졌다.

5. 결론

도마뱀 발바닥을 모방한 건식 접착 구조물을 제작하여 금속 코팅을 하였을 때 코팅 두께에 따라 접착강도 변화를 살펴보았다. 금속 코팅 두께에 따른 접착강도를 보기 위해 건식 접착 구조물에 금, 아연, 인듐으로 코팅 두께가 2 nm~10 nm가 되도록 코팅을 진행하였다. 금속 코팅 두께에 따른 건식 접착 구조물의 접착강도를 알아보기 위해 Pure shear test를 진행하였다. 코팅 두께에 따른 접착강도가 왜 변하는지 알아보기 위해 건식 접착 구조물이 없는 시험편에 금속 코팅 두께를 달리하여 코팅한 후 접촉각을 측정하였다. 접착강도 실험과 접촉각 실험을 통해 금속 재료의 표면에너지가 작고 접촉각이 작을수록 높은 접착강도를 가지는 것을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 건식 접착 구조물에 인듐 코팅 두께가 4 nm, 아연 코팅 두께가 8 nm, 금 코팅 두께가 6 nm 일 때에 가장 높은 접착강도를 가졌다.

후기

본 연구는 2012학년도 안동대학교 연구비 (2012-0020)에 의해 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Autumn, K., Hsieh, S. T., Dudek, D. M., Chen, J., Chitaphan, C. and Full, R. J., 2006, "Dynamics of Geckos Running Vertically," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 209, pp. 260~272.
- (2) Autumn, K., Sitti, M., Liang, Y. A., Peattie, A. M., Hansen, W. R., Sponberg, S., Kenny, T., Fearing, R., Israelachvili, J. N. and Full, R. J., 2002, "Evidence for van der Waals Adhesion in Gecko Setae,"

- Proceedings National Academy of Sciences*, Vol. 99, No. 19, pp. 12252~12256.
- (3) Schubert, B., Lee, J., Majidi, C. and Fearing, R. S., 2008, "Sliding-induced Adhesion of Stiff Polymer Microfibre Arrays. I. Microscale Behaviour," *Journal of The Royal Society Interface*, Vol. 5, No. 25, pp. 835~844.
- (4) Schubert, B., Lee, J., Majidi, C. and Fearing, R. S., 2008, "Sliding-induced Adhesion of Stiff Polymer Microfibre Arrays. II. Microscale Behaviour," *Journal of The Royal Society Interface*, Vol. 5, No. 25, pp. 845~853.
- (5) Sitti, M. and Fearing, R. S., 2003, "Synthetic Gecko Foot-hair, Micro/Nano-structures as Dry Adhesives," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 18, pp. 1055~1074.
- (6) 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, No. 5899, pp. 238~242.
- (7) Lee, J. and Fearing, R.S., 2008, "Contact Self-cleaning of Synthetic Gecko Adhesive from Polymer Microfibers," *Langmuir*, Vol. 24, No. 10 pp. 587~591.