

나노 또는 마이크로 입자의 전사를 이용한 건식 접착제의 제조 및 특성 분석

유민지¹ · Minh Canh Vu¹ · 한석진² · 박재홍^{3,4} · 김성룡^{1†}

¹한국교통대학교 나노고분자공학전공, ²㈜세일하이텍, ³나노종합기술원 나노구조소재연구실, ⁴㈜나노인 연구센터
(2019년 03월 19일 접수, 2019년 03월 25일 수정, 2019년 03월 26일 채택)

Fabrication and characterization of the nano- and micro-particles applied dry adhesives

Min Ji Yu¹, Minh Canh Vu¹, Sukjin Han², Jae Hong Park^{3,4}, and Sung-Ryong Kim^{1,†}

¹Department of Polymer Science and Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

²R&D Center, Seil Hitec Co., Ltd., Cheongju 28119, Korea

³Nanostructure and Materials R&D Team, Korea National Nanofab Center, Daejeon 34141, Korea

⁴Research Center, NanoIn Inc., Daejeon 34166, Korea

(Received March 19, 2019; Revised March 25, 2019; Accepted March 26, 2019)

요약: 본 연구에서는 마이크로 또는 나노 입자 형상을 폴리디메틸실록산 (PDMS)에 전사시켜 건식 접착제를 제조하고 특성에 대하여 고찰하였다. 20 nm, 40 nm, 70 nm의 직경을 가지는 구리 나노 입자 형상과 5 μm 의 직경을 가지는 폴리메틸메타아크릴레이트 (PMMA) 마이크로 입자 형상을 전사시켜 PDMS 건식 접착제를 제조하였다. 입자의 종류 및 크기가 변화함에 따라 건식 접착제의 기계적 특성, 인장 접착강도, 표면 형상, 접촉각, 광학적 성질에 미치는 영향을 조사하였다. 20 nm 직경을 가지는 구리 나노 입자를 전사시켜 얻은 건식 접착제는 bare PDMS 필름에 비하여 300% 이상 향상된 인장 접착강도를 가졌다. 나노 입자를 전사시켜 얻은 큰 표면적 건식 접착제 구조가 높은 인장 접착강도를 부여하는 원인으로 추정된다. 본 연구결과는 나노 입자를 전사시키는 방법이 PDMS 건식 접착제의 제조에 있어 쉽고 효과적임을 시사한다.

Abstract: In this study, the micro- and nano-particles were used and their shapes were transferred into the polydimethylsiloxane (PDMS) film to fabricate the dry adhesives and their properties were investigated. The Cu nanoparticles of the sizes of 20 nm, 40 nm and 70 nm and the polymethylmethacrylate (PMMA) beads of the size of 5 μm were used to transfer their images and the resultant properties of the dry adhesives were compared. The effects of particle size and materials on the mechanical property, tensile adhesion strength, light transmittance, surface morphology, water contact angle were studied. The dry adhesives obtained from the transfer process of Cu nanoparticles with the size of 20 nm resulted in the enhancement of tensile adhesion strength more than 300% compared to that of the bare PDMS. The formation of nanostructure of large surface area on the surface of the PDMS film by the Cu nanoparticles may responsible for the improvement. This study suggests that the use of nanoparticles during the fabrication of PDMS dry adhesives is easy and effective and could be applied to the fabrication of the medical patch.

Keywords: Dry adhesives, Cu nanoparticle, Polymethylmethacrylate bead, Adhesion strength.

[†] Corresponding author: Sung-Ryong Kim (srkim@ut.ac.kr)

1. 서론

건식 접착은 접착제를 사용하는 기존의 화학 접착과는 상반되는 개념으로서, 별도의 화학물질을 사용하지 않고 나노 구조를 이용하여 접촉 표면과의 반데르발스 힘을 주된 접착 메커니즘으로 이용한다. 반데르발스 힘은 두 물체 사이의 거리에 크게 의존하며, 보통 수 nm 이하의 거리에서 유효하게 작동하며 재료의 종류나 나노 구조의 형태에 의해 영향을 받는다.

자연모사 연구를 통하여 건식 접착을 재현하려는 연구는 20여 년 전부터 진행되어 왔다[1-3]. 자연모사를 이용한 건식 접착제는 피부와 접촉시켜 심전도 측정을 하는 의료용 패치 등에 사용할 수 있고 기존의 화학 접착제가 유발하는 피부 자극이나 불쾌감을 없앨 수 있는 장점이 있다. 건식 접착제에 존재하는 마이크로 기둥 구조물 사이의 간격으로 인해 통풍성을 유지할 수 있고 땀의 원활한 배출을 도와 습한 느낌을 제거할 수 있기 때문이다[4,5].

게코도마뱀은 건식 접착을 통해 천장이나 벽을 걸어 다닐 수 있는 것으로 알려져 있다. Autumn 등은 게코도마뱀이 발바닥에 있는 수 백만 개의 마이크로 스케일 또는 나노 스케일의 계층구조를 가지고 분자간의 반데르발스 인력을 이용하여 10 N/cm² 크기의 접착력과 반복 접착력을 가지고 있다는 연구결과를 발표하였다[1,2]. 게코도마뱀의 발바닥은 마이크로 섬모 (setae)의 끝 부분에 아주 미세한 나노섬모 또는 나노팁 (spatula)이 붙어 있는 다층 구조로 되어있고, 나노팁 때문에 거친 표면에서도 높은 접착력을 가지는 것으로 보고되어 있다[2,4].

자연모사를 이용한 건식 접착제를 개발하기 위하여 많은 연구자들이 탑다운 (top-down) 혹은 바텀업 (bottom up) 방법으로 접근하여 연구를 진행하여 왔다. 특히, 멀티스케일이나 계층구조를 이용하여 건식 접착력을 향상시킨 결과들이 많이 소개되었으며[6-9], 이런 연구들을 통하여 건식 접착에 대한 보다 깊은 이해가 가능해졌다. Suh 등은 건식접착을 가지는 기본 조건으로 마이크로 섬모와 나노 섬모로 된 다층구조, 마이크로 기둥의 경사도, 나노 섬모의 존재 등이 높은 건식접착력을 가지는 주요 조건으로 제시하였다[10]. 기둥의 종횡비가 3인 경우 가장 높은 접착력을 보이고, 종횡비가 이보다 클 경우에는 구조물이 무너짐이나 서로 달라붙는 현상이 발생하여 오히려 줄어든다고 보고하였다[10].

Pang 등은 마스크를 이용하고 몰딩 프로세스를 도입하여 만들어진 기둥 구조의 상층이나 옆면에 백금과 같은 금속을 증착 시킨 후 한쪽 면만을 전자빔으로 선택적으로 조사하고 백금과 고분자의 열팽창계수 차

이에 의해 기울어진 나노구조를 만들어 접착력이 증가하고 장기간 이용이 가능하다는 것을 보였다[11].

건식 접착 분야에서 주로 사용하는 재료로는 생체에 무해하고 대면적 공정이 가능한 UV경화형 폴리우레탄 아크릴레이트 (PUA)나 폴리디메틸실록산 (PDMS)이 있는데 PDMS는 PUA 보다 표면오염, 산화 등에 우수한 장점이 있다[12,13]. PDMS와 같은 경화형 고분자 소재는 경화제의 함량과 종류, 경화온도, 경화시간 등을 변경하여 탄성률이나 강도와 같은 기계적 성질을 조절할 수 있고 쉽게 구조물을 만들 수 있기 때문에 많이 이용되어 왔다. PDMS 재료를 사용해서 건식 접착제를 제조할 경우 PDMS 기둥이나 섬모의 탄성률이 너무 작으면 건식 접착제의 초기 접착력은 크지만 나노 기둥들이 쉽게 무너지거나 서로 달라 붙을 수 있어 밀집한 나노 기둥 구조를 유지시키기가 힘든 문제가 있다. 경화제의 함량이 10 wt%인 일반 경화조건에서는 직경이 400 nm 이하이고 종횡비가 1 이상인 PDMS 나노기둥을 만들기가 어렵고, 경화제 함량이 15 wt% 이상 포함되어 탄성률이 너무 높으면 초기 접착력이 나오지 않는 것으로 보고되었다[6].

Bae 등은 나노 구조의 붕괴 없이 높은 접착력을 갖기 위해 폴리우레탄 아크릴레이트 마이크로 기둥 위에 소프트한 PDMS를 나노 스케일로 코팅시키는 방법을 이용하여 우수한 접착력과 장기간 안정성을 얻었다[14].

하지만 지금까지 진행되어온 대부분의 연구들은 나노 기둥 구조물을 만들기 위하여 많은 단계의 공정을 사용하였는데 특히, 진공하에서 반도체 식각공정, 수직 에칭공정, 수평 방향의 오버에칭 등의 공정을 사용하여야 하기 때문에 가격이 비싸 상업화에 많은 제약과 가지고 있다[10].

본 연구에서는 구리 나노 입자와 PMMA 마이크로 입자의 형상을 PDMS 필름 표면에 전사시켜 나노 또는 마이크로 구조를 포함하는 건식 접착제를 제조하고 입자의 크기 및 종류에 따른 기계적 성질, 광투과도, 접촉각, 인장 접착강도 등에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험

2.1. 재료 및 시약

본 연구에서는 열경화성 폴리디메틸실록산 (polydimethylsiloxane)을 건식 접착 구조물로 사용하였다. Fig 1. 의 구조를 가지는 PDMS는 상업적으로 생산되는 실리콘계 고분자로 우수한 신축성, 열적 안정성, 전기절연성, 화학적 안정성, 난연성을 가지고 있고[15], 패턴 전사, 플렉시블 디바이스 촉각센서, 태양전지용 접착제, LED 조명 밀봉 재료 등의 다양한 용도로 사용되고 있다[12,13,16].

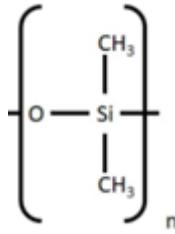


Figure 1. Structure of PDMS.



Figure 2. Schematic steps to prepare a micro- and nano-structured PDMS film.

특히, PDMS 고분자는 우수한 신축성과 투명성을 가지고 있기 때문에 의료용 접착패치, 웨어러블 디바이스 기재물의 주요 후보 물질이다. 본 연구에서는 PDMS(Sylgard 184A, Dow Corning Co., USA)를 경화제(Sylgard 184B, Dow Corning Co., USA)와 10:1로 혼합하여 상온에서 열경화 시켰으며 혼합액의 점도는 3900 cP였으며 밀도는 0.965 g/cm³였다.

PDMS 필름 표면에 마이크로 구조나 나노 구조를 도입하기 위하여 직경이 5 μm인 열경화성 폴리메틸메타아크릴레이트 (PMMA) 마이크로 비드 (MH-5FD, Kolon Co., Korea)와 직경이 20 nm ~ 70 nm 인 Cu 나노 입자 (CN Vision Co, Korea)를 각각 사용하였다.

Fig 2. 는 scotch 테이프의 접착면 위에 얇게 PMMA 마이크로 비드나 구리 나노 입자를 입힌 후 PDMS 혼합액을 도포하고 70 °C에서 2시간 경화 시킨 후에 PDMS 필름을 scotch 테이프로부터 떼어내어 마이크로 입자나 나노 입자 형상 구조가 PDMS 표면에 전사되는 단계를 보여주고 있다.

2.2. 특성 분석

구리 입자나 PMMA 입자를 전사시켜 얻어진 PDMS 필름의 표면구조를 관찰하기 위하여 수 mm 에서 수 nm 범위에서 3차원 구조 형상 측정을 할 수 있는 레이저 현미경 (VK-X1000, Keyence Co., USA)를 이용하였다.

건식 접착제의 인장 강도, 인장 탄성률, 인장 접착강도는 Fig 3. 과 같은 텍스처 시험기 (SurTA 1A, Chemilab Co., Suwon, Korea)를 ASTM D3330 방법에 의거하여 상온에서 수행하였으며 크로스 헤드 속도는 5 mm/s 였다. 인장 접착강도 실험을 하기 위하여 상온에서 막대 형태의 프루브 (probe)를 100 gram의 힘으로 1초간 누른 후 반대 방향으로 떼어 낼 때의 응력을 측정하였다. 인장 실험을 위한 시편의 크기는 25×70×1.0 mm 였으

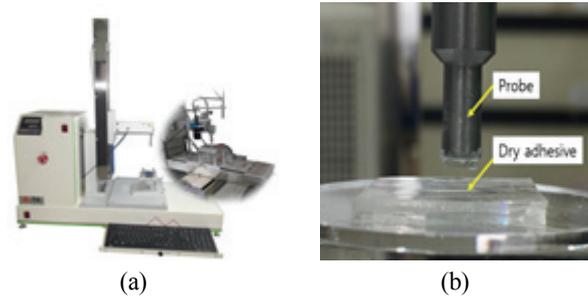


Figure 3. (a) High precision texture analyzer, (b) Magnified view of the probe and sample.

며 게이지 길이는 30 mm였으며, 인장 탄성률은 응력-변위 곡선에서 5% 미만 변위 영역의 직선 기울기로부터 구하였다. 인장 접착강도 측정용 시편의 크기는 10 mm x 20 mm 이상이였으며, 프루브 끝에 슬라이드 글라스 (2.5 mm x 2.5 mm)를 붙여서 접착력을 측정하였다. 모든 실험에서 3개의 시편으로 얻은 결과로부터 평균을 구하여 사용하였다.

건식 접착제의 광투과도는 UV-Vis 분광계(LS50B, Perkin-Elmer Co., USA)를 이용하여 300 ~ 800 nm의 파장에서 측정하였으며, 건식 접착제 표면의 접촉각을 측정하기 위하여 접촉각 측정기 (Phoenix-10, SEO Co., Korea)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

PDMS 기반의 건식 접착제의 표면에 마이크로나 나노 크기의 입자를 이용하여 나노 요철 구조를 도입시켜 기계적 성질, 인장 접착강도, 광투과도, 접촉각 등에 미치는 영향을 알아보았다.

3.1. 기계적 성질

PDMS와 PMMA 마이크로 입자와 구리 나노 입자의 형상을 전사시킨 PDMS 필름의 기계적 성질을 측정하였다. Fig 4. 는 bare PDMS와 나노 구리 입자와 PMMA 마이크로 비드의 형상을 전사시켜 얻은 PDMS 필름의 응력-변위 곡선을 보여주고 있다. PDMS 필름 표면에 도입되는 입자의 직경이 커짐에 따라 인장 강도와 파단 신율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 모든 시편은 모두 선탄성 (linear elastic) 파괴 거동을 보여주고 있으며 bare PDMS의 경우의 파단 응력은 90 N/cm²을 가지는 데 비하여 5 μm의 PMMA 입자들을 전사시켜 제조한 PDMS 필름의 경우에는 상대적으로 낮은 57 N/cm²의 파단 응력을 가지는 것을 보여주고 있다. 선탄성 특성을 가지는 PDMS 필름에 마이크로 입자나 구리 나노 입자가 전사되어 생긴 PDMS 표면의 요철 구조는 응력

이 집중되는 효과 때문에 파단 응력을 감소시키는 것으로 생각된다.

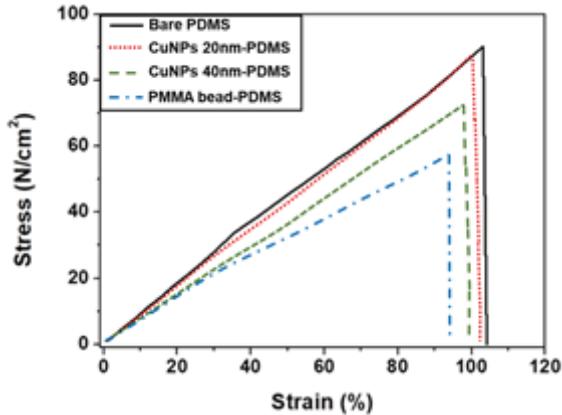


Figure 4. Stress-strain curves of the bare PDMS, Cu nanoparticle and PMMA bead transferred PDMS film.

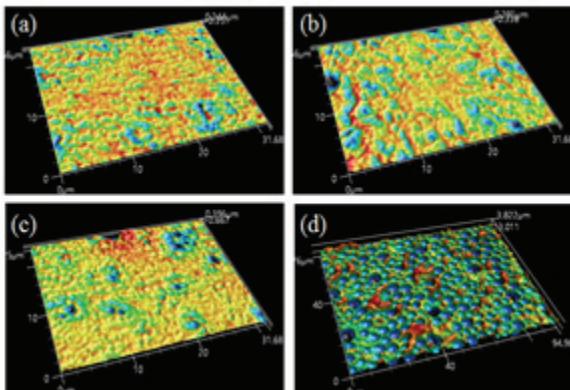


Figure 5. Laser microscope surface images of transferred PDMS dry adhesives (a) Cu NPs of 20 nm, (b) Cu NPs of 40 nm, (c) Cu NPs of 70 nm, and (d) PMMA beads of 5 μm diameter.

두 종류 시편의 파단 신율을 살펴보면 bare PDMS의 경우에는 104%를 가지는데 비하여 PMMA 마이크로 입자를 적용한 경우에는 앞서 기술한 인장강도가 떨어지는 것과 동일한 이유로 파단 신율이 94%로 감소한 것으로 추정된다. 이와 같은 실험 결과는 표면에 도입되는 노치 (notch)와 같은 거친 구조가 선탄성 파괴 거동을 가지는 재료의 파단 응력 및 파단 신율을 감소시킨다는 사실과 일치한다.

3.2. 표면 구조

건식 접착제의 기계적 성질 및 광학적 성질 등을 설명하기 위하여 레이저 현미경을 사용하여 표면 구조를 관찰하였다. Fig 5. 에서 보여주는 바와 같이, 사용된 구리 입자의 크기가 커질수록 나노 입자들이 서로 뭉

친 부분이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 20 nm의 구리 입자를 전사시켜 얻은 PDMS접착제 표면의 경우에는 전체 영역이 매우 균일한 표면 구조를 가지는데 비하여 구리 입자가 40 nm 또는 70 nm인 경우에는 표면이 상대적으로 균일하지 않음을 관찰할 수 있다. PMMA 마이크로 입자를 전사시켜 얻은 PDMS 필름 표면은 구리 나노 입자로부터 얻은 필름에 비하여 표면 구조가 예상한 바와 같이 뚜렷한 차이가 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 마이크로 크기의 표면구조는 Fig 4. 에서의 인장 강도 저하를 뒷받침 해주는 결과이다.

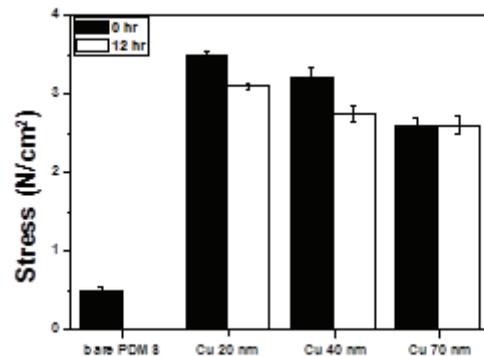


Figure 6. Tensile adhesion strength of the bare PDMS and various sizes of Cu nanoparticle transferred PDMS films.

3.3. 접착 특성

Bare PDMS와 다양한 직경을 가지는 구리 필러를 전사시켜 나노 요철 구조를 도입하여 제조한 PDMS 필름 건식 접착제의 인장 접착강도 실험결과를 Fig 6. 에 나타내었다. 순수 PDMS로 제조한 건식 접착제의 경우에는 0.5 N/cm^2 의 인장 접착강도를 가지는데 비하여 구리 나노 필러를 이용하여 제조한 PDMS 접착제들은 높은 초기 접착력을 가졌다. 특히, 20 nm의 직경을 가지는 구리 나노 입자를 전사시킨 PDMS 필름의 경우에는 3.53 N/cm^2 의 인장 접착강도를 가져 bare PDMS 대비 300% 이상 향상된 결과를 얻었다. 구리 입자의 직경이 40 nm와 70 nm로 커짐에 따라 접착력이 각각 3.25 N/cm^2 , 2.70 N/cm^2 으로 감소되었다. 이는 입자의 직경이 증가함에 따라 전사되어 생성되는 표면적이 점차적으로 감소되어 반데르발스 힘을 감소시키는 결과로 보여진다.

한편, 초기 인장 접착강도를 측정 후 12 시간이 지난 후에 접착강도를 다시 측정하여 Fig 6. 에 비교하였다. 12시간이 경과하였을 때 나노 입자 크기의 차이에 관계 없이 인장 접착강도는 다소 감소하거나 유사한 값을 유지하였다. 20 nm 직경을 가지는 경우에는 12시간 경과 후 3.5 N/m^2 에서 3.2 N/m^2 로 약 10% 인장 접착

강도가 감소하였다. 본 실험에서 사용한 PDMS의 경화 시간이 상온에서 48 시간 인 것을 고려하면 12 시간 동안 경화가 일부 일어나면서 인장 접착강도가 감소한 것으로 보인다. 한편, 40 nm 구리 나노 입자를 전사시켜 제조한 건식 접착제에서도 20 nm의 구리 나노 입자를 전사시킨 건식 접착제와 유사한 감소 경향을 보였다.

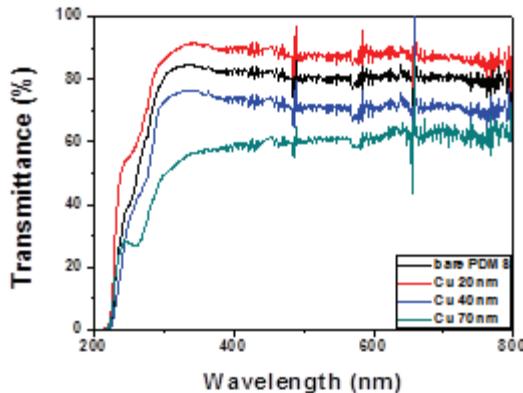


Figure 7. Light transmittance as a function of the particle sizes of Cu nanoparticles.

3.4. 광학적 성질

상처 관찰이 가능한 건식 접착제나 의료용 진단패치로 적용되기 위해서는 광투과도가 높은 소재가 선호된다. Fig 7. 은 입자 파장에 따른 PDMS로 만든 건식 접착제의 광투과도 결과이다.

순수 PDMS 수지는 Fig 7. 에서 볼 수 있듯이 540 nm 파장에서 81.5%의 광투과도를 가졌으며, 20 nm의 구리 나노 입자를 전사시켜 얻은 PDMS 필름의 경우에는 광투과도가 88.6%로 증가하였다. 구리 입자에 의해 PDMS 필름 표면에 생긴 표면구조에 의해 입사 광선의 산란효과가 감소하여 광투과도가 증가한 것으로 추정된다. 하지만 40 nm와 70 nm의 구리 나노 입자를 전사시켜 얻은 건식 접착 필름의 경우에는 순수 PDMS 필름보다 전 파장 영역에서 광투과도가 감소하였으며 구리 입자의 크기가 40 nm에서 70 nm로 증가함에 따라 광투과도가 감소하였다. 경화된 PDMS를 scotch 테이프에서 떼어낼 때 일부의 구리 입자들이 뭉친 형태로 PDMS 필름 쪽으로 이동되어 입사광선을 산란시키는 역할을 하여 건식 접착제의 광투과도를 떨어트린 것으로 추정할 수 있다. 20 nm와 40 nm의 구리 나노 입자를 전사시켜 제조한 건식 접착제는 가시광선 파장에서 70% 이상의 광투과도를 가지기 때문에 의료용 투명 패치 용도로 적용이 가능한 수준이다.

3.5. 표면 에너지

건식 접착 시스템은 오염 가능성이 높고 반복적 사용이 어려운 화학접착제와 차별화되며, 접촉된 표면에 잔류물이 남지 않은 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 표면 특성과 내오염성을 보여주는 지표로 물 접촉각을 측정하였다. 접촉각이 90° 이상일 경우에는 표면에 떨어지는 물방울이 퍼지면서 자국을 형성하는 대신에 구형을 유지하면서 흘러내리면서 먼지에 대한 자정 작용을 할 수 있다.

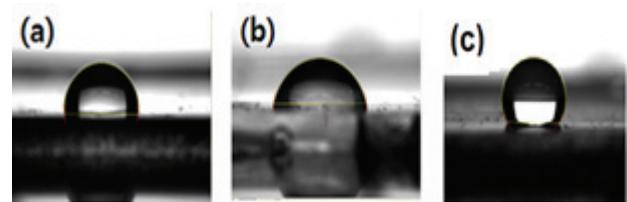


Figure 8. Water contact angle of (a) bare PDMS (b) Cu NPs of 20 nm, (c) PMMA beads of 5 μ m transferred PDMS dry adhesives.

Fig 8. 에서 볼 수 있듯이 bare PDMS의 물 접촉각은 97.9°로 비교적 높은 값을 나타내어 낮은 표면에너지를 가짐을 알 수 있다. PDMS의 표면에너지는 19.8 mN/m으로 [17], 폴리테트라플루오르에틸렌보다 표면에너지가 낮은 것으로 알려진 것을 감안하면 PDMS의 높은 접촉각은 예상될 수 있는 값이다. Cu 나노 입자를 전사시켜 얻은 PDMS 표면의 접촉각이 상대적으로 낮아진 것을 관찰할 수 있었다. 구리의 표면에너지가 1370 mN/m로 매우 높기 때문에 약간의 구리 입자라도 PDMS 필름쪽 표면으로 이동한다고 가정하면 PDMS 표면의 표면에너지를 높게 하고 접촉각을 낮게 할 수 있다. Fig 5. (b), (c)의 레이저 현미경 표면 이미지는 표면에너지가 높은 일부의 Cu 나노 입자들이 전사과정에서 PDMS 필름 표면으로 이동되어 불균일한 표면을 형성한 것으로 추정할 수 있다. 한편, PMMA bead를 이용하여 전사시킨 경우에는 접촉각이 129.7°로 아주 크게 증가하였는데, PMMA의 표면에너지가 41.1 mN/m로 PDMS보다 높은 것을 감안하면, PMMA 입자가 PDMS 필름쪽으로 이동하여 발생한 것으로 보기는 힘들고, Fig 5. (d)에서 관찰된 표면의 기하학적인 마이크로 요철에 효과 (composite effect)에 의해 접촉각이 증가한 것으로 생각할 수 있다. 이러한 결과는 Cu 나노입자를 이용한 건식접착제의 인장 접착강도 증가를 뒷받침해 준다.

4. 결론

본 연구에서는 구리 나노 입자나 PMMA 마이크로

입자를 이용하여 전사시켜 얻은 PDMS 필름 건식 접착제의 기계적 성질, 표면 형상, 표면 특성, 광학적 성질을 알아보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

마이크로 입자나 나노 입자를 사용하여 얻은 PDMS 건식 접착제의 인장강도 및 탄성률은 감소하였으며 이는 PDMS 표면에 형성된 요철 구조 때문으로 추정되며 이와 같은 요철 구조는 PMMA 비드를 적용한 경우에 접착각을 크게 높이는 역할을 하는 것으로 보인다. 구리 나노 입자를 사용하였을 경우에는 전사과정 중에 일부의 구리 입자들이 PDMS 건식 접착제 쪽으로 이동하여 접착각을 낮추는 것으로 예상할 수 있다. 구리 입자의 크기가 20 nm 인 경우에 가장 높은 건식 접착력을 얻을 수 있었으며 이는 20 nm 구리 나노 입자를 사용하여 얻은 표면에서 극대화된 접촉면을 가지기 때문으로 추정된다. 본 연구의 결과는 쉽고 간단하여 반복 사용이 가능한 저렴한 의료용 패치 제작에 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역 신산업선도인력양성사업 (No. 2016H1D5A190 8330)과 기초연구 (No. 2017R1A2B4005200) 사업의 지원에 의해 이루어졌습니다.

References

1. K. Autumn et al. *Nature* **405**, 6787, 681 (2000)
2. K. Autumn, A. M. Peattie, *Inter. Comp. Biol.*, **42**, 1081 (2002)
3. S. N. Gorb and M. Varenberg, *J. Adhes. Sci. Technol.*, **21**, 1175 (2007).
4. S. N. Gorb, *Philos. Trans. R. Soc. A*, **366**, 1557 (2008).
5. W. G. Bae, D. Kim, M. K. Kwak, L. Ha, S. M. Kang, and K. Y. Suh, *Adv. Healthcare Mater.*, **2**, 109 (2013).
6. M. K. Kwak, H. E. Jeong and K. Y. Suh, *Adv. Mater.*, **23**, 3949 (2011).
7. H. E. Jeong, S. H. Lee, P. Kim, K. Y. Suh, *Nano letters*, **6**, 1508 (2006)
8. C. Greiner, A. Eduard, D. C. Aránzazu, *Advanced Materials*, **21**, 479 (2009)
9. M. Sitti, S. F. Ronald, *J. Adhesion Sci. & Tech.*, **17**, 1055 (2003)
10. 김정훈, 서갑양, *기계와재료*, **23**, 16 (2011).
11. C. Pang, T. Kim, W. G. Bae, D. Kang, S. M. Kim and K. Y. Suh, *Adv. Mater.*, **24**, 445. (2012)
12. L. J. Yang, H. H. Wang, P. C. Yang, Y. C. Chung, and T. S. Sheu, *Sensors and Materials*, **19**, 391 (2007).
13. T. W. Odom, J. C. Love, D. B. Wolfe, K. E. Paul, and G. M. Whitesides, *Langmuir*, **18**, 5314 (2002).
14. W. G. Bae, M. K. Kwak, H. E. Jeong, C. Pang, H. Jeong, and K. Y. Suh, *Soft Matter*, **9**, 1422 (2013)
15. I. Yilgor, E. Yilgor, *Polym. Bull.*, **40**, 525, (1998).
16. J. M. K. Ng, I. Gitlin, A. D. Stroock, and G. M. Whitesides, *Electrophoresis*, **23**, 3461 (2002).
17. D. W. Van Krevelen, K. Te Nijenhuis. "Properties of polymers" Elsevier, Amsterdam, Chapter 8 (2009)