



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사 학위논문

문어 빨판 구조와 탄성계수의 조절을 통한
접착 패치의 건습식 환경에서
접착력 향상을 위한 연구

**A study on adhesion improvement of adhesive
patches in dry and wet environments by manipulating
octopus suction cup structures and elastic moduli**

울산대학교 대학원

화 학 과

구 태 우

A study on adhesion improvement of adhesive
patches in dry and wet environments by
manipulating octopus suction cup
structures and elastic moduli

지도교수 이 승 구

이 논문을 이학석사학위 논문으로 제출함

2024년 02월

울 산 대 학 교 대 학 원

화 학 과

구 태 우

구태우의 석사학위 논문을 인준함

심사위원 이승구 인

심사위원 이형일 인

심사위원 김범진 인

울산대학교 대학원

2024년 02월

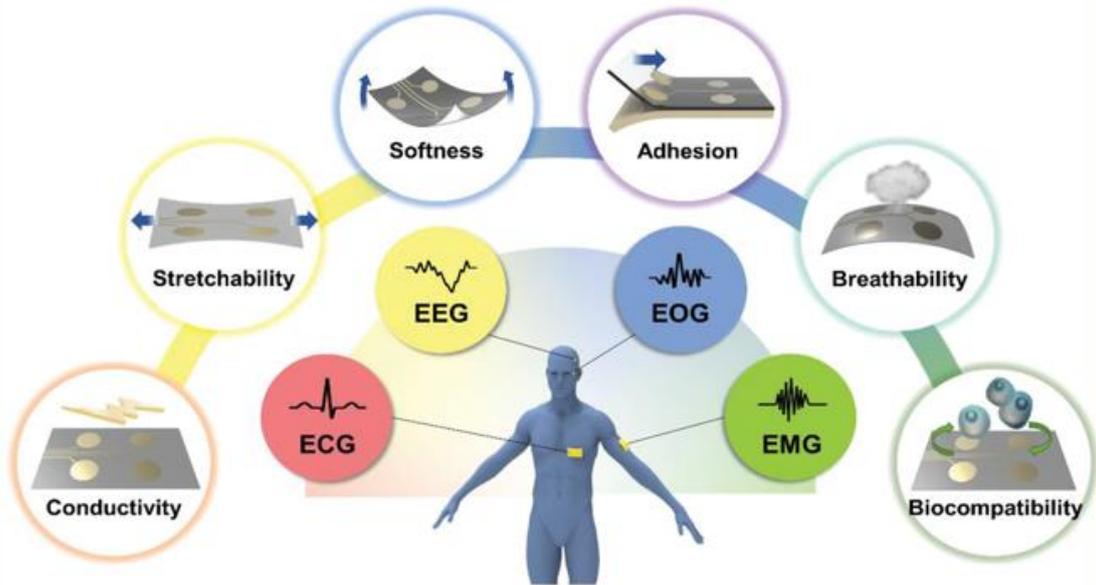
목차	1
초록	2
1. 서론	8
2. 실험	10
3. 결과 및 고찰	15
4. 결론	21
참고문헌	22

초 록

웨어러블 디바이스는 우리의 몸에 부착해 다양한 환경에서 생체신호를 정확하고 빠르게 측정해야 한다. 생체 신호를 측정하기 위한 기존의 접착 패치는 아크릴 기반의 화학물질을 이용하였다. 기존의 접착제는 아크릴 기반의 접착제로 경우 피부의 표면을 손상시키고, 잔여물을 남기며, 다양한 환경에서 접착할 수 없는 단점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 게코 도마뱀의 발바닥이나 버섯모양의 팁과 같은 생물에서 영감을 받은 접착 패치들이 선행 연구되어왔다. 그러나 부착한 표면에 화학적 오염물을 남기지 않고, 습하고 건조한 환경 모두에서 성능이 우수하고 반복적으로 접착할 수 있는 접착 패치의 개발은 여전히 필요하다.

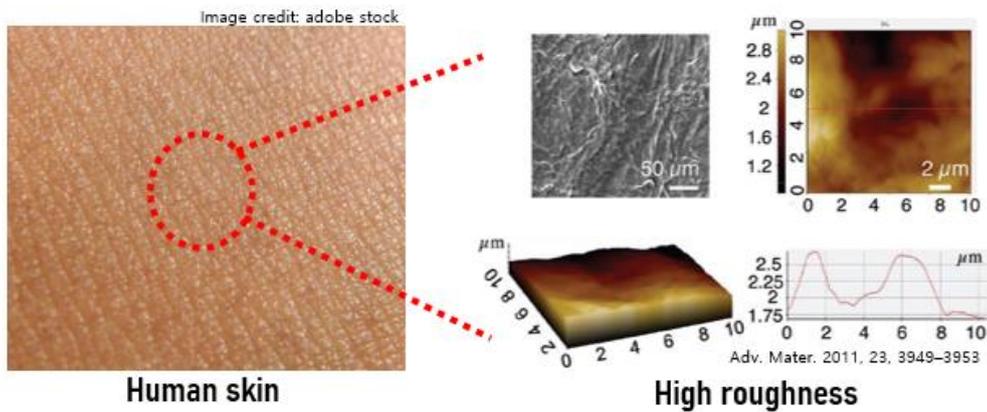
본 연구에서는 선행된 문어 빨판 접착 패치 Suction cup 부분에 Inking 공정을 도입해 생체에 적합하고 건조하거나 습한 환경에서 높은 접착력을 가지는 접착 패치를 제안한다. 문어의 영감을 받은 패치는 PDMS의 modulus를 이용해 PDMS와 PDMS 경화재의 함량을 조절한 후 간단한 몰딩 과정을 통해 제작된 패치에 Inking 공정을 통해 만들어질 수 있다. 또한 접착력에 영향을 주는 문어 빨판 접착 패치의 여러가지 환경을 조절하여 접착 거동을 확인하였다. 우리는 문어 빨판 접착 패치의 접착력을 force gauge를 이용해 확인하였고, Dry와 Wet한 환경에서 우수한 접착력을 보이는 것을 확인하였다.

Types and characteristics of healthcare devices



Advanced Science, Volume: 8, Issue: 2, First published: 04 December 2020, DOI: (10.1002/advs.202001938)

Characteristics of human skin



Extraordinary stretchable

Image credit: Guinness World Records



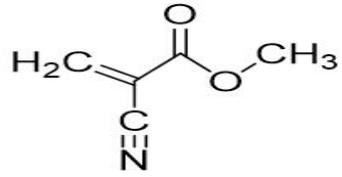
Sweat & hairs

Image credit: Pimongpim w/Shutterstock

Traditional adhesive patch



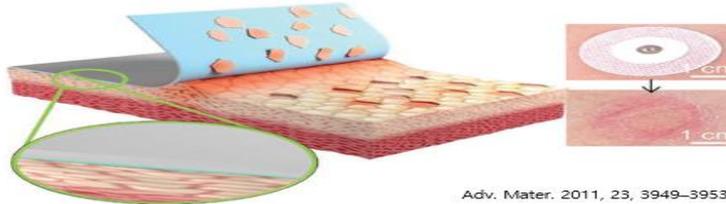
Acrylic based adhesives



Methyl cyanoacrylate



- Skin damage
- Residue
- Not repeatable
- Not moist / Flat surface



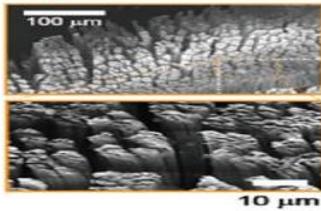
Adv. Mater. 2011, 23, 3949–3953

Biocompatible patch

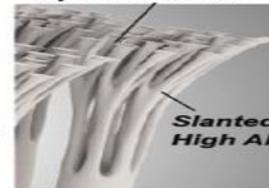
- Dry adhesive patch
- Vander Waals force



Spatulae Head



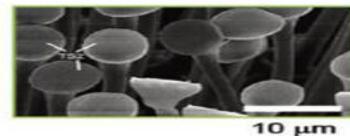
Mimicking



Adv. Funct. Mater. 2011, 21, 3606–3616



Mushroom-shaped Tip



Mimicking

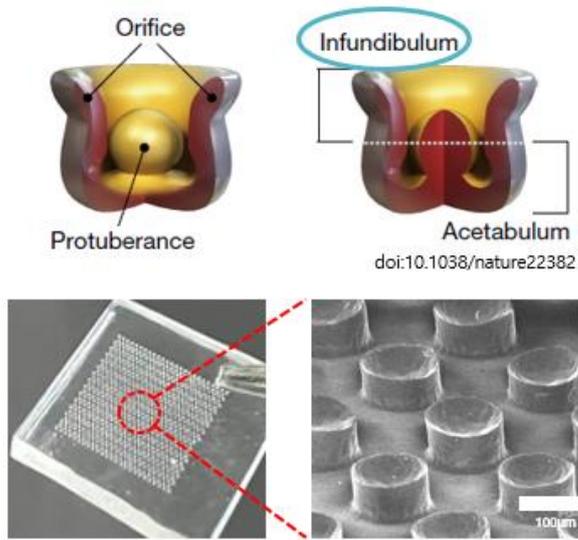


Adv. Funct. Mater. 2011, 21, 3606–3616

Biocompatible patch

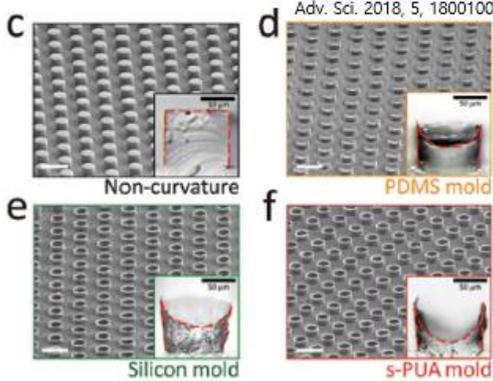
● Wet adhesive patch

● Suction effect

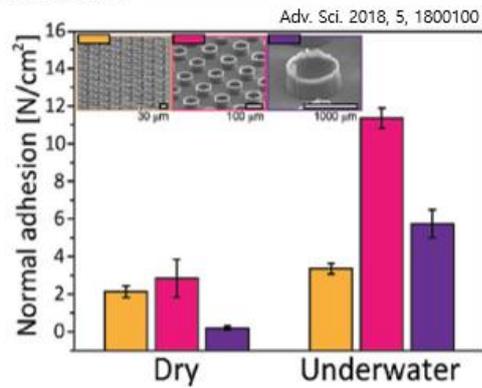


doi:10.1038/nature22382

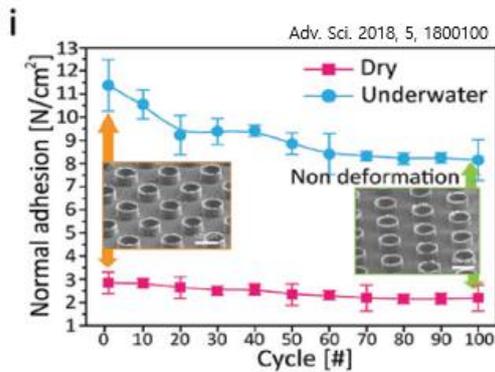
Previous research



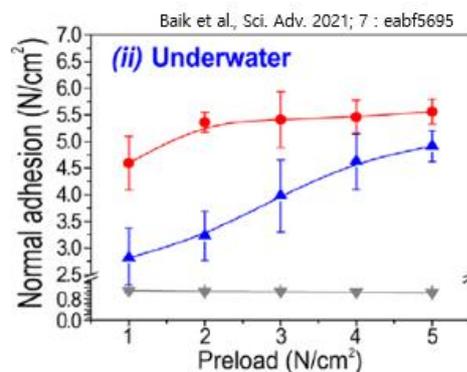
● Change of material



● Change of diameter

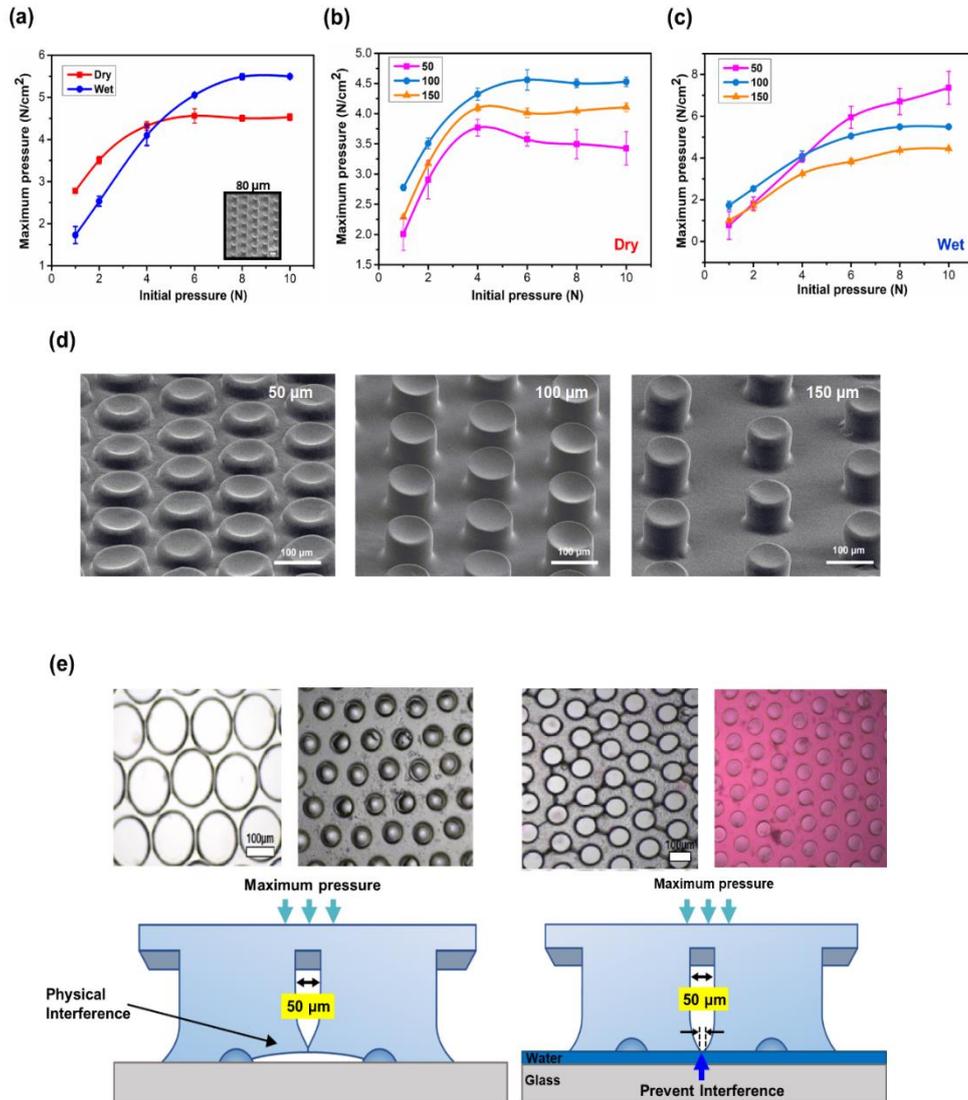


● Change of adhesion cycles

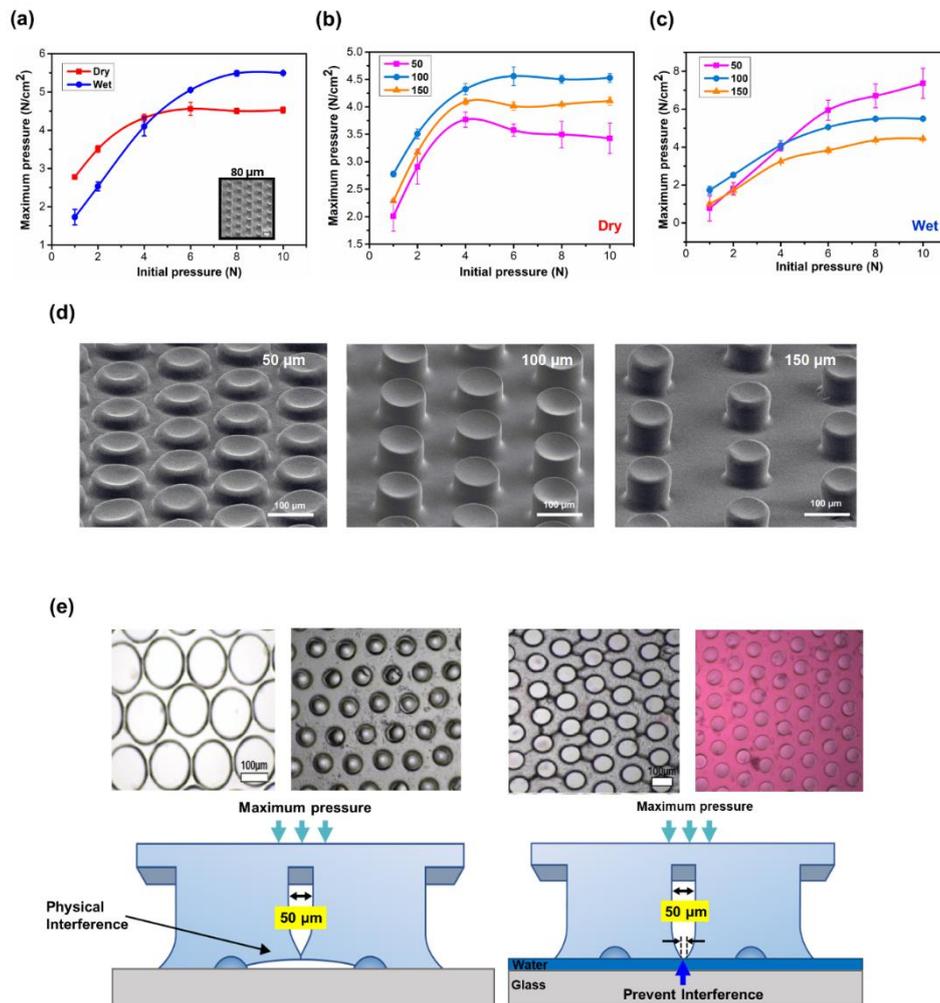


● Change of preload

Previous research



Previous research



1. 서론

사람들의 건강에 관한 관심이 증가함에 따라 웨어러블 device 중 헬스케어 device에 대한 관심이 증가하고 있다. 헬스케어 장치에는 근전도 (EMG)^{1, 2}, 심전도 (ECG)^{3, 4}, 뇌전도 (EEG)⁵ 등이 있다. 헬스케어 장치로부터 건강에 관련된 signal을 얻기 위해서는 인간의 피부 특징과 헬스케어 device의 특성을 모두 알아야한다. 인간의 피부는 표면에 땀과 같은 수분이 있고, 털이 존재하며, 신축성이 뛰어나며 거칠다.^{6, 7} 이런 특징을 가지는 피부 표면에 헬스케어 device를 부착시켜 올바른 정보를 얻기 위해 헬스케어 device는 피부 밀착성^{8, 9}, 신축성^{10, 11}, 생체 적합성^{12, 13}, 전도성^{14, 15} 등의 필수적인 특성을 가져야한다. 기존의 헬스케어 device 부착을 위한 패치들은 methyl cyanoacrylate 같은 acry계열의 접착제를 사용해왔다. Acry계열 접착제는 수분이 있는 표면이나 평평하지 않은 표면에 잘 붙지 않는 단점이있고, 사용 후 피부에 발진을 일으키는 한계를 가진다.⁷

acry계열의 접착제의 한계점을 극복하기 위해 딱정벌레¹⁶, 개코도마뱀^{7, 17, 18}과 같은 생물에서 영감을 받은 건식 접착 패치에 대한 연구들이 진행되어왔다. 개코도마뱀의 발바닥은 수많은 미세 털로 인해 표면과의 접촉 면적이 넓어 Van Der Waals interaction이 최대화되어 건조한 환경에서 큰 접착력을 나타낸다.^{19, 20} 건식 접착 패치의 장점에는, self cleaning 능력이 있어 반복적인 재사용이 가능하다.²⁰⁻²³ 또한 사용 후 표면에 화학적 성분이 존재하기 때문에 오염 및 잔류물을 남기지 않고 외부 자극에 영향을 크게 받지 않는다.¹⁹

더 나아가 사람의 피부 표면에는 땀과 같은 수분이 존재하므로 건조한 표면뿐만 아니라, 빨판 상어나, 문어 빨판과 같은 수중 생물에서 영감을 받아 수분이 있거나 수중에서도 접착력이 높은 생체적합형 패치에 대한 연구가 진행되어왔다.²⁴⁻²⁸ 문어 빨판 패치의 경우 부착시

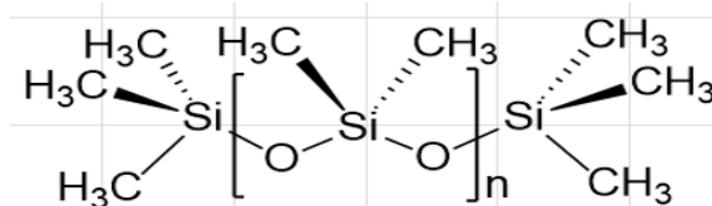
진공을 형성하는 suction effect가 생겨 수분이 있는 표면에서도 큰 접착력을 나타낸다.^{29, 30} 이전의 연구에서 문어 빨판의 상부 구조인 infundibulum 구조를 모방한 접착 패치가 개발되었고, 구조체의 aspect ratio, 구조체의 직경, 구조체의 밀도, 압력에 따른 접착력 차이를 확인하였다.²⁵ 그러나 높은 습한 환경 접착력에 비해 건조한 환경에서의 접착력을 향상시킬 수 있는 연구가 더 필요하다.

본 연구에서는 광경화물질인 poly(urethane acrylate)(PUA)와 실리콘 탄성체인 poly(dimethyl siloxane)(PDMS) 두 가지 물질을 사용하여 문어의 상부 구조인 infundibulum을 모방한 습식 접착 패치에 inking 공정을 도입하는 방법을 제시하고자 한다. Spin coating된 PDMS 위에 이전 연구에서 제작된 문어 빨판 접착 패치를 inking 한 뒤, hydrophobic처리가 된 glass에 올려 적절한 무게를 가하면 inking 공정이 도입된 문어 빨판 접착 패치를 얻었다. 제작된 문어 빨판 접착 패치는 잔여물을 남기지 않고, 건·습한 환경에서도 접착이 가능한 장점이 있다. 본 연구에서는 접착력에 영향을 주는 inking process 과정에서의 PDMS의 두께, 가해주는 무게, PDMS와 curing agent의 비율별 최대 접착력을 확인하였다.

2. 실험

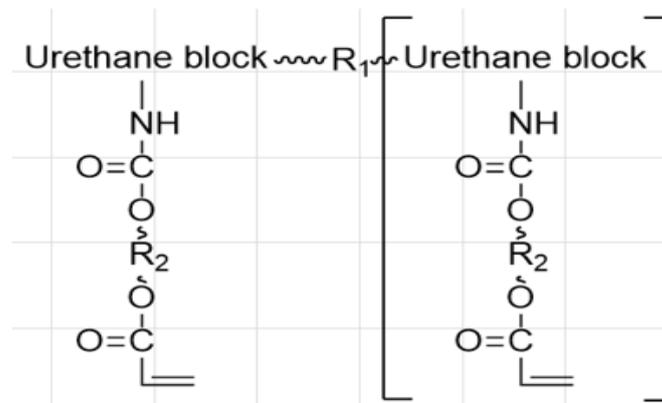
2. 1. 시약 및 재료

광경화형 polyurethane acrylate (PUA)는 미뉴타텍의 311RM을 사용하였고 Polydimethylsiloxane은 Dow corning사의 sylgard 184를 사용하였다. Trichloro(1H, 1H, 2H, 2H-perfluorooctyl)silane, 3-(trimethoxysilyl)propyl acrylate는 Sigma-Aldrich 사에서 구매하여 별도의 정제과정 없이 사용하였다. Absolute ethanol은 Fisher Scientific 사에서 구매하여 별도의 정제과정 없이 사용하였다. Acetone은 SK chemical 사에서 구매하여 별도의 정제과정 없이 사용하였다. 물은 A.F.Lab 사의 B-Roup15를 사용하여 제조된 1차 증류수를 사용하였다. spacer는 polyimide 테이프(thickness 50 μm)를 사용하였다. 포토리소그래피 실험에 사용한 장비는 inverted optical microscopy (Nikon, Eclipse Ti2-E), digital micromirror devices (DMD, Andor, Mosaic 3) 이며, 광원은 Prior사의 Lumen 200을 사용하였다.



Poly(dimethyl siloxane) (PDMS)

● Hydrophobic



Poly(urethane acrylate) (PUA)

● UV curing prepolymer

2. 2. 실험방법

2. 2. 1. 글래스 표면의 실란 처리

슬라이드 및 커버 글래스를 1M 수산화 나트륨 용액에 1시간 동안 담구어 표면의 불순물을 제거한 뒤, 증류수로 세척한다. 세척된 슬라이드 글래스는 O₂ 플라즈마 처리 (Harrick Plasma PDC-32G-2, 30초)를 통해 표면의 수산기를 활성화시킨 뒤, 3-(trimethoxysilyl)propyl acrylate 가 ethanol에 5 % (v/v) 희석된 용액에 담구어 2시간 동안 반응시킨다. 반응이 끝난 글래스는 ethanol을 사용하여 세척한 뒤, 80 °C 오븐에서 30분간 열처리한다. O₂ 플라즈마 처리를 한 커버 글래스는 진공 데시게이터에 30 μ l의 trichloro(1H, 1H, 2H, 2H-perfluorooctyl)silane와 같이 넣고 진공상태에서 2시간동안 반응시킨다. 실란 처리 후 글래스는 ethanol로 세척한다.

31

2. 2. 2. Negative mold 제작을 위한 포토 리소그래피

acylate silane 처리된 슬라이드 글래스에 PUA를 올린 뒤 기포가 생기지 않게 fluoroalkyl silane 처리된 커버 글래스로 덮어주었다. 두께는 spacer를 통해 조절하였다. 만들어진 글래스에 광원(Lumen 200, Prior)을 통해 나온 UV 빛이 digital micromirror devices (DMD, Andor, Mosaic3)를 통해 원하는 모양의 빛으로 반사되고, 이를 PUA에 노출시켰다. 노출 시간의 조절을 통해 cylinder를 만들었으며, hexagonal 배열을 제작하기 위해 여러 번 fluoroalkyl silane 처리된 커버 글래스를 열어 산소를 공급해 구조체 사이의 간섭을 줄였다. fluoroalkyl silane 처리된 글래스와 spacer를 제거한 뒤 미반응 PUA를 물과 소량의 ethanol을 통해 제거하였다. 만들어진 구조체는 fluoroalkyl silane 처리를 진행하였으며, 반응이 끝난 뒤 소프트리소그래피의 레플리카 몰딩 기법을 이용해 구조체 위에 PDMS prepolymer 와 curing agent를 10:1 (w/w) 비율로 섞은 혼합물을 붓고 80°C에서 2시간동안 경화시켜 negative mold를 제작하였

다.

2. 2. 3. 제작된 Negative mold를 이용한 문어 빨판 구조 형성

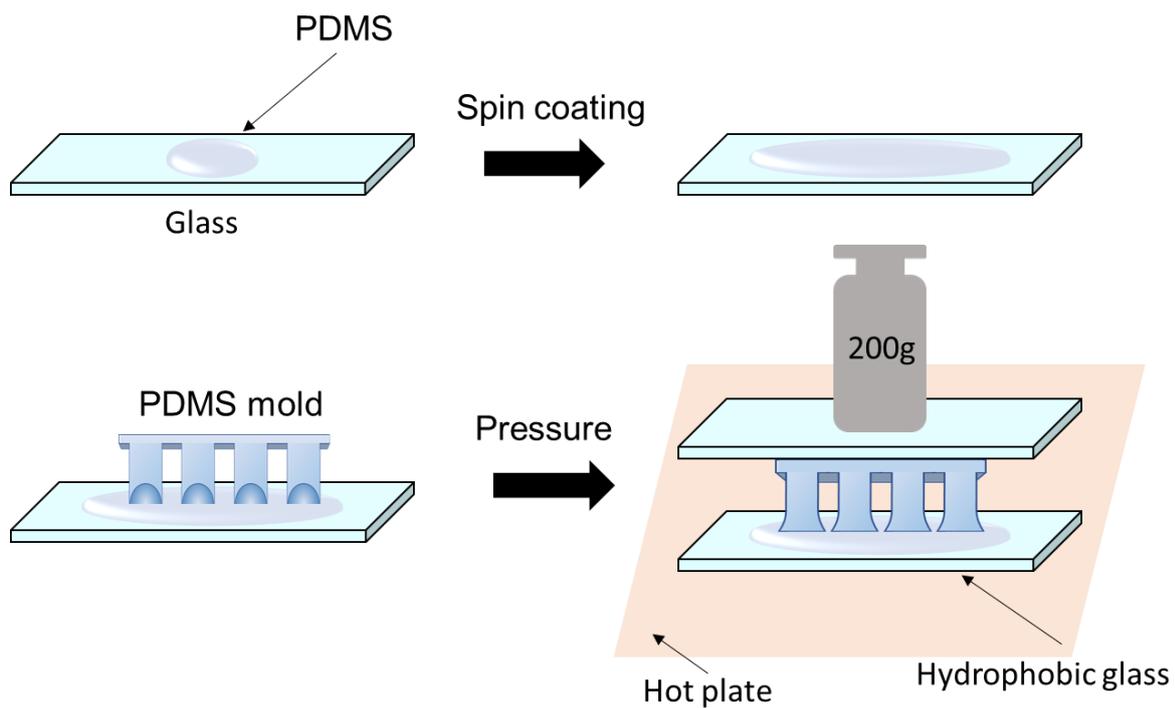
제작된 negative mold를 진공 데시게이터에 30 μl 의 trichloro(1H, 1H, 2H, 2H-perfluorooctyl)silane와 같이 넣고 진공상태에서 2시간동안 반응시킨다. Fluoroalkyl silane 처리 후 에탄올을 이용해 세척 후 80°C 오븐에 15분 열처리한다. scheme. 2와 같이 Fluoroalkyl silane 처리한 negative mold에 PUA(311RM)를 올린 뒤 깨끗한 글래스로 덮는다. 자체 제작된 박막경화기를 사용하여 일정한 압력을 준 후 PUA의 높이를 조절하여 기포를 포집하였다.^{25, 27} 그 후 PUA를 UV(365nm)에 2분간 노출시켜 기포가 포집된 모양을 고정하였다. Negative mold를 글래스로부터 peel-off시켜 문어 빨판 모양의 배열을 얻었으며 완전한 경화를 위해 문어 빨판 모양이 형성된 PUA-글래스를 UV에 10분간 더 경화시켰다. 완성된 문어 빨판 모양의 PUA 배열을 레플리카 몰딩 기법을 이용해 PDMS prepolymer 와 curing agent를 10:1 (w/w) 비율로 섞은 혼합물을 붓고 80°C에서 2시간동안 경화시켜 문어 빨판 모양의 PDMS 접착 패치를 제작하였다.

2. 2. 4. 제작된 문어 빨판 구조에 inking process 도입

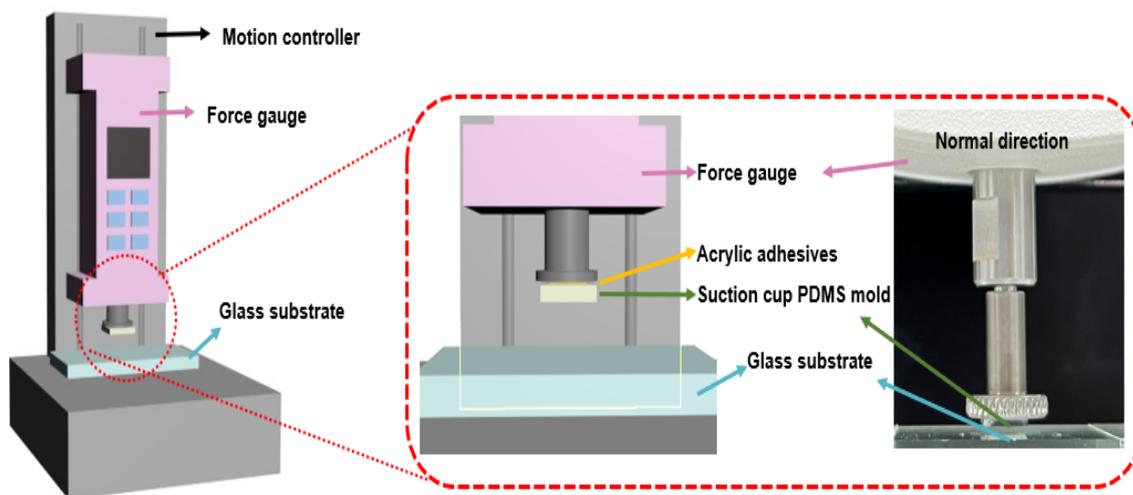
Scheme. 1에서 보는 바와 같이 PDMS를 글래스 위에 떨어뜨린 후 30초 동안 Spin coating 한다. Spin coating 후 제작된 PDMS 접착 패치를 inking 한다. Inking된 PDMS 접착 패치를 Fluoroalkyl silane 처리된 glass에 올린 뒤 추를 이용해 무게를 가하며 100°C hot plate 위에서 30분 동안 가열한다.

2. 2. 5. 분석

문어 빨판 PDMS 접착 패치의 구조 분석은 scanning electron microscopy (SEM, JEOL-7610F)를 사용하여 확인하였다. Scheme. 2와 같이 문어 빨판 접착 패치의 접착력과 cyclic test는 motion controller가 있는 force gauge (Mark-10, M7-05)를 사용하여 측정하였고, 글래스가 dry와 wet한 상태에서 각각 3회 측정한 후 최댓값을 사용하였다. Force gauge로 압력을 가한 후 pressing time은 10초로 고정하였다.



Scheme 1. Schematic diagram of the PDMS mold inking process.



Scheme 2. Normal adhesive force measurement using force gauge

3. 결과 및 고찰

3. 1. 문어 빨판 구조의 inking 두께에 따른 접착 특성 분석

Fig. 1(a)와 같이 우리는 문어 빨판을 모방한 문어 빨판 접착 패치에 inking process를 도입하였다. Fig. 1(b)와 같이 spin coater의 회전속도(RPM)을 조절하면 PDMS의 두께를 control할 수 있다. 두께를 조절 후 가해주는 압력은 200g으로 동일하게 가하며 경화 시켜주었을 때, inking된 문어 빨판 접착 패치를 얻을 수 있다. Fig. 1(c)와 같이 force gauge를 사용하여 inking 두께에 따른 최대 접착력을 측정하였다. 동일하게 모두 2.5N의 힘과 10초의 pressing time을 주었다. 측정 결과를 보면 3 μ m의 두께로 inking하였을 때, 가장 높은 접착력을 보인다.

Inking 두께가 20 μ m, 10 μ m의 경우 팁의 끝부분에만 부분적으로 inking 되는 것이 아니라 표면 전체적으로 경화되는 것을 알 수 있다. 5 μ m일 때 전체 패치의 45%만 기존의 문어 빨판 형태를 유지하며 inking이 되었고, 3 μ m와 1 μ m의 경우만 패치의 모든 부분이 문어 빨판 형태를 유지한채 inking이 가능하였다. 하지만 1 μ m는 inking 두께가 너무 얇아 기존의 suction cup의 직경인 100 μ m와 거의 동일한 100.57 μ m를 가지며, 최대 접착력이 기존의 문어 빨판 접착 패치와 같음을 알 수 있다.

(1)

$$\sigma_{total} = \Delta P_{max} \pi r_v^2 n + \pi (\hat{r}^2 - r_v^2) \gamma n \left(\frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{h'} + \frac{2}{\hat{r}^2 - r_v^2} \right)$$

식 (1)에서 ΔP_{max} 는 주변 환경 사이의 압력차와 빨판 안의 압력, n 은 단위면적 당 빨판의 개수, γ 는 물의 표면장력($\approx 0.072 J m^{-2}$), θ_1 은 글래스 표면에서 증류수의 접촉각, θ_2 는 PUA 표면에서 증류수 접촉각, $\hat{r}^2 - r_v^2$ 는 구조체의 접촉 면적, 그리고 h' 는 액체층의 두께이다.²⁵

따라서 구조체의 높이는 80 μ m로 동일하고 단위면적 당 빨판의 개수, 가해주는 압력은 동일하지만 inking을 통해 구조체와 표면 사이의 접촉 면적이 늘어나기 때문에 가장 표면적이 넓은 3 μ m일 때, 가장 높은 접착력을 나타낸다.

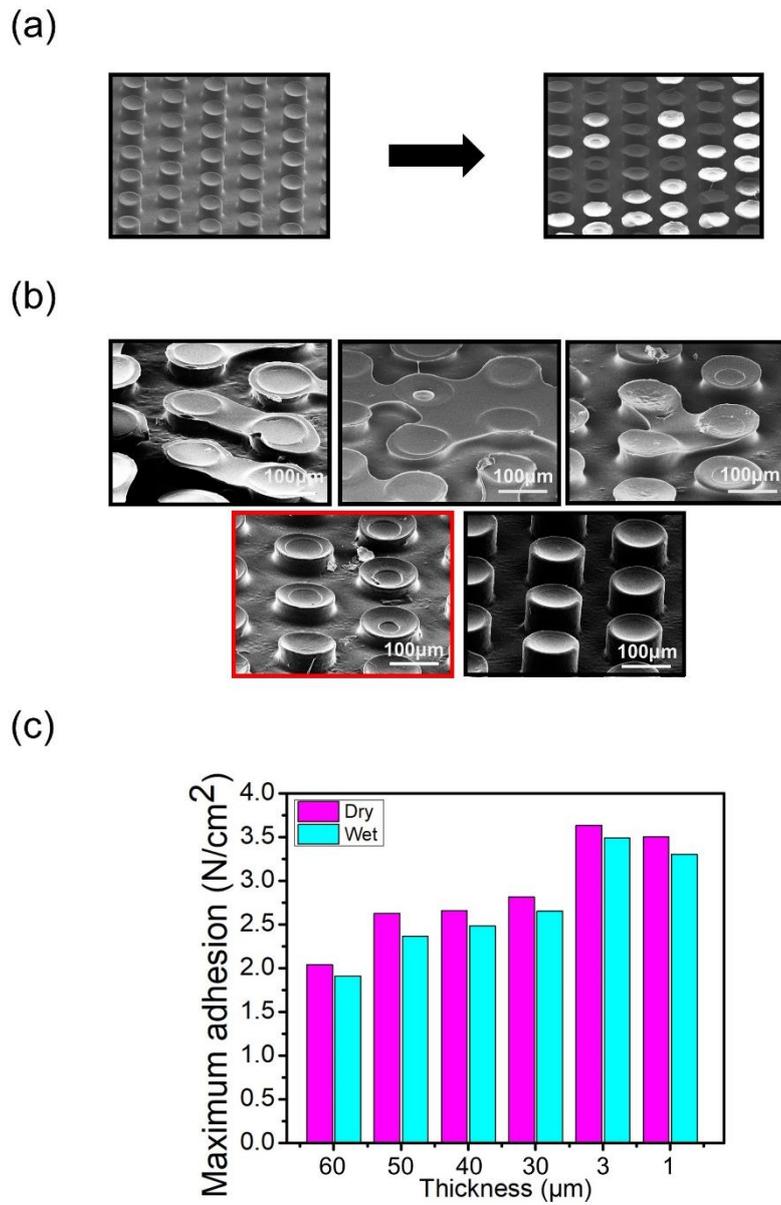


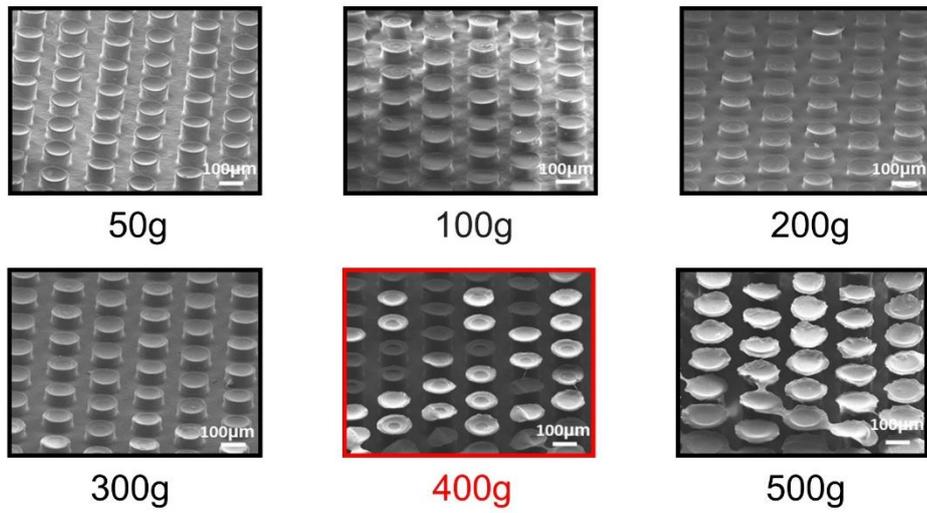
Figure 1. (a) Octopus suction cup adhesive patch with inking process, (b) SEM image of the suction cup mold with different inking thickness, (c) Adhesion force (2.5N) in dry and wet environments depending on different different inking thicknesses,

3. 2. 문어 빨판 구조의 inking 무게 따른 접착 특성 분석

Scheme. 1의 inking process 중 마지막 과정과 같이 추를 통해 압력을 주며 PDMS가 경화가 되었을 때 Fig. 2(a)와 같이 inking 두께는 앞선 실험을 통해 $3\mu\text{m}$ 를 동일하게 조건을 가지며, 압력차에 따라 각기 다른 팁모양을 가진 문어 빨판 패치가 된다. Fig. 2(b)와 같이 force gauge를 사용하여 가해주는 압력차에 따른 최대 접착력을 측정하였다. 동일하게 모두 2.5N의 힘과 10초의 pressing time을 주었다. 측정 결과를 보면 400g의 무게로 inking하였을 때, 가장 높은 접착력을 보인다. Fig. 2(a)의 이미지에서 50g, 100g, 200g, 300g, 400g, 500g의 순서대로 평균의 직경이 $101.7\mu\text{m}$, $105.3\mu\text{m}$, $110.2\mu\text{m}$, $113.4\mu\text{m}$, $120.5\mu\text{m}$, $128.1\mu\text{m}$ 의 직경을 가지며 200g부터 500g까지의 경우 팁의 표면에 inking이 잘 되는 것을 볼 수 있다. 500g의 경우에도 inking이 잘 되는 것을 알수 있지만, 넓어진 표면의 팁 모양이 일정하지 않아 접착시에는 suction cups에 air leakage가 발생하여 접착력이 400g보다 낮은 것을 확인할 수 있다.

식 (1)을 통해 문어 빨판이 가지는 총 스트레스는 문어 빨판의 구조체가 표면에 접착되는 면적에 비례하므로 건조하거나 습한 환경 모두에서 압력을 가장 많이 가해준 500g의 접착 패치가 접착력이 가장 높을 것으로 예상했다. 그러나 Fig. 2(b)와 같이 400g에서 건조한 환경과 습한 환경에서 최대 접착력을 보였다.

(a)



(b)

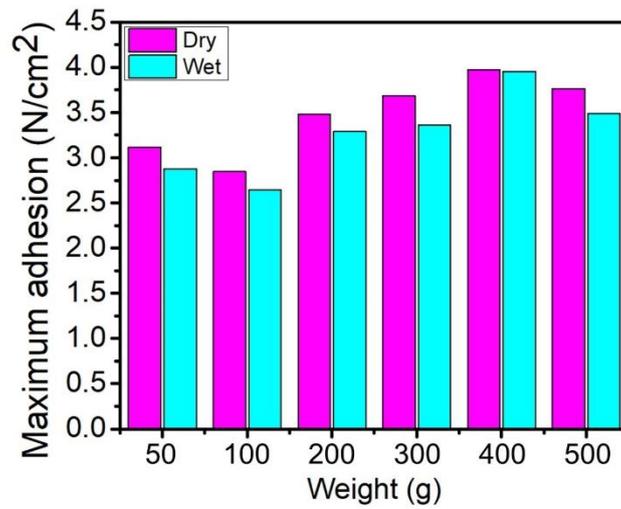


Figure 2. (a) SEM image of the suction cup mold with different inking weight, (b) Adhesion force (2.5N) in dry and wet environments depending on different inking weight

3. 3. 문어 빨판 구조의 inking시 PDMS/curing agent의 함량 ratio에 따른 접착 특성 분석

Fig3. (a)에서 PDMS와 curing agent 함량 비가 5:1, 10:1, 20:1, 30:1까지 suction cups의 평균이 각 119.4 μ m, 118.4 μ m, 118.8 μ m, 119.5 μ m로 증가하는 것을 보아 표면적이 늘어난 것을 보아 inking이 잘 되었음을 볼 수 있다. 하지만 40:1, 50:1의 경우 각 101 μ m, 102 μ m로 curing agent 함량이 너무 적어 inking이 잘 되지 않는 것을 볼 수 있다. Fig3. (b)에선 PDMS/curing agent 함량이 5:1에서부터 30:1까지는 증가하는 것을 알 수 있지만, inking이 되지 않은 40:1, 50:1에서는 기존의 문어 빨판 접착 패치의 접착력과 비슷한 접착력을 보여준다. Fig3. (c)에서는 PDMS/curing agent 함량비가 5:1, 10:1, 20:1, 30:1일 때 문어 접착 패치의 cyclic test 결과를 확인할 수 있었고 재사용시 점점 접착력이 감소하는 경향을 띄지만, washing 후에는 처음 접착력 수치와 비슷한 값으로 회복이 되는 것을 보아 수차례 재사용이 가능할 것으로 보인다.

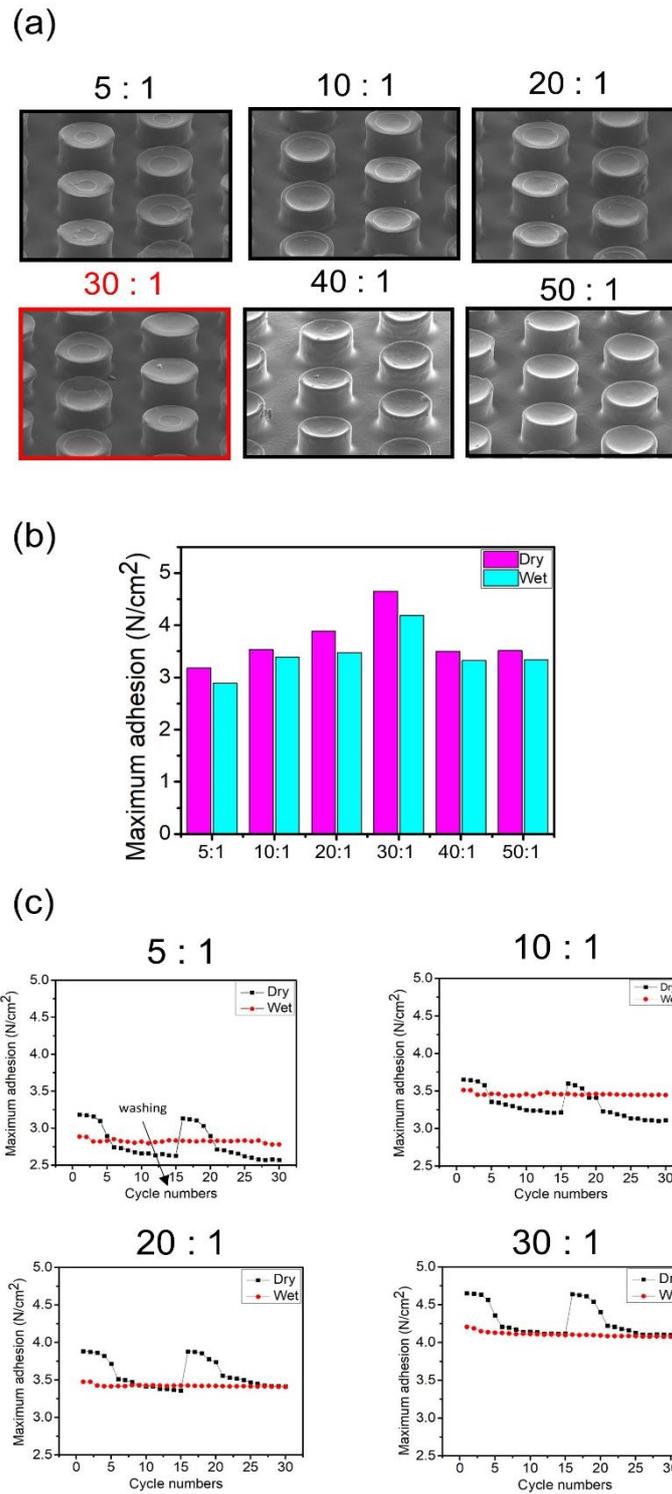


Figure 3. (a) SEM image of the suction cup molds with different ratio of PDMS/curing agent, (b) Adhesion force (2.5N) in dry and wet environments depending on ratio with PDMS/curing agent, (c) cyclic test with different ratio with PDMS/curing agent

4. 결론

본 연구에서는 기존의 문어 빨판 패치 제작에 inking process의 도입 통해 접착력에 팁의 표면적을 넓혀 주었을 때, PDMS/curing agent함량을 바꾸어 주었을 때 달라지는 접착 특성을 분석하였다. Inking시 spin coating을 이용한 두께와, 외부 압력을 이용하여 최대 접착력을 확인하였다. 두께의 경우 $3\mu\text{m}$, 무게의 경우 400g에서 접착력이 가장 높았고, PDMS/curing agent 함량의 경우 30:1에서 가장 높았다. Fig. 5(a)와 같이 제작된 문어 빨판 패치는 건조한 글래스(50g)를 수중으로 옮기는 것이 가능하고, 수중에서도 부착이 가능하다.

1. Nawrocki, R. A.; Jin, H.; Lee, S.; Yokota, T.; Sekino, M.; Someya, T., Self-adhesive and ultra-conformable, Sub-300 nm dry thin-film electrodes for surface monitoring of biopotentials. *Advanced Functional Materials* **2018**, *28* (36), 1803279.
2. Vu, P. P.; Vaskov, A. K.; Irwin, Z. T.; Henning, P. T.; Lueders, D. R.; Laidlaw, A. T.; Davis, A. J.; Nu, C. S.; Gates, D. H.; Gillespie, R. B., A regenerative peripheral nerve interface allows real-time control of an artificial hand in upper limb amputees. *Science translational medicine* **2020**, *12* (533).
3. Son, D.; Kang, J.; Vardoulis, O.; Kim, Y.; Matsuhisa, N.; Oh, J. Y.; To, J. W.; Mun, J.; Katsumata, T.; Liu, Y., An integrated self-healable electronic skin system fabricated via dynamic reconstruction of a nanostructured conducting network. *Nature nanotechnology* **2018**, *13* (11), 1057-1065.
4. Cea, G.; Spyropoulos, P.; Jastrzebska-Perfect, J.; Ferrero, J.N.; Gelinas, D.; Khodagholy, "Enhancement-mode ion-based transistor as a comprehensive interface and real-time processing unit for in vivo electrophysiology". *Nat. Mater* **2020**, *19*, 679-678.
5. Tong, Y.; Liu, J., Review of Research and Development of Supernumerary Robotic Limbs. *IEEE CAA J. Autom. Sinica* **2021**, *8* (5), 929-952.
6. Moon, J.; Yi, G.; Oh, C.; Lee, M.; Lee, Y.; Kim, M., A new technique for three-dimensional measurements of skin surface contours: evaluation of skin surface contours according to the ageing process using a stereo image optical topometer. *Physiological measurement* **2002**, *23* (2), 247.
7. Kwak, M. K.; Jeong, H. E.; Suh, K. Y., Rational design and enhanced biocompatibility of a dry adhesive medical skin patch. *Advanced Materials* **2011**, *23* (34), 3949-3953.
8. Baik, S.; Lee, H. J.; Kim, D. W.; Kim, J. W.; Lee, Y.; Pang, C., Bioinspired adhesive architectures: from skin patch to integrated bioelectronics. *Advanced Materials* **2019**, *31* (34), 1803309.
9. Yi, H.; Lee, S. H.; Seong, M.; Kwak, M. K.; Jeong, H. E., Bioinspired reversible hydrogel adhesives for wet and underwater surfaces. *Journal of Materials Chemistry B* **2018**, *6* (48), 8064-8070.
10. Yu, B.; Kang, S.-Y.; Akthakul, A.; Ramadurai, N.; Pilkenton, M.; Patel, A.; Nashat, A.; Anderson, D. G.; Sakamoto, F. H.; Gilchrest, B. A., An elastic second skin. *Nature materials* **2016**, *15* (8), 911-918.
11. Gallagher, A.; Ní Annaidh, A.; Bruyère, K. In *Dynamic tensile properties of human skin*, IRCOBI Conference 2012, 12-14 September 2012, Dublin (Ireland), International Research Council on the Biomechanics of Injury: 2012.
12. Miyamoto, A.; Lee, S.; Cooray, N. F.; Lee, S.; Mori, M.; Matsuhisa, N.; Jin, H.; Yoda, L.; Yokota, T.; Itoh, A., Inflammation-free, gas-permeable, lightweight, stretchable on-skin electronics with nanomeshes. *Nature nanotechnology* **2017**, *12* (9), 907-913.
13. Rivnay, J.; Owens, R. i. M.; Malliaras, G. G., The rise of organic bioelectronics. *Chemistry of Materials* **2014**, *26* (1), 679-685.
14. Wu, H.; Yang, G.; Zhu, K.; Liu, S.; Guo, W.; Jiang, Z.; Li, Z., Materials, Devices, and Systems

of On-Skin Electrodes for Electrophysiological Monitoring and Human–Machine Interfaces. *Advanced Science* **2021**, *8* (2), 2001938.

15. Huigen, E.; Peper, A.; Grimbergen, C., Investigation into the origin of the noise of surface electrodes. *Medical and biological engineering and computing* **2002**, *40* (3), 332-338.

16. Pang, C.; Kwak, M. K.; Lee, C.; Jeong, H. E.; Bae, W. G.; Suh, K. Y., Nano meets beetles from wing to tiptoe: Versatile tools for smart and reversible adhesions. *Nano Today* **2012**, *7* (6), 496-513.

17. Kwak, M. K.; Pang, C.; Jeong, H. E.; Kim, H. N.; Yoon, H.; Jung, H. S.; Suh, K. Y., Towards the next level of bioinspired dry adhesives: new designs and applications. *Advanced Functional Materials* **2011**, *21* (19), 3606-3616.

18. Bae, W. G.; Kwak, M. K.; Jeong, H. E.; Pang, C.; Jeong, H.; Suh, K. Y., Fabrication and analysis of enforced dry adhesives with core-shell micropillars. *Soft Matter* **2013**, *9* (5), 1422-1427.

19. 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., Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2002**, *99* (19), 12252-12256.

20. Hansen, W. R.; Autumn, K., Evidence for self-cleaning in gecko setae. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2005**, *102* (2), 385-389.

21. Kim, S.; Cheung, E.; Sitti, M., Wet self-cleaning of biologically inspired elastomer mushroom shaped microfibrillar adhesives. *Langmuir* **2009**, *25* (13), 7196-7199.

22. Lee, J.; Fearing, R. S., Contact self-cleaning of synthetic gecko adhesive from polymer microfibers. *Langmuir* **2008**, *24* (19), 10587-10591.

23. Feng, L.; Li, S.; Li, Y.; Li, H.; Zhang, L.; Zhai, J.; Song, Y.; Liu, B.; Jiang, L.; Zhu, D., Super-hydrophobic surfaces: from natural to artificial. *Advanced materials* **2002**, *14* (24), 1857-1860.

24. Baik, S.; Hwang, G. W.; Jang, S.; Jeong, S.; Kim, K. H.; Yang, T.-H.; Pang, C., Bioinspired Microsphere-Embedded Adhesive Architectures for an Electrothermally Actuating Transport Device of Dry/Wet Pliable Surfaces. *ACS Applied Materials & Interfaces* **2021**, *13* (5), 6930-6940.

25. Baik, S.; Kim, J.; Lee, H. J.; Lee, T. H.; Pang, C., Highly adaptable and biocompatible octopus-like adhesive patches with meniscus-controlled unfoldable 3D microtips for underwater surface and hairy skin. *Advanced Science* **2018**, *5* (8), 1800100.

26. Baik, S.; Lee, H. J.; Kim, D. W.; Min, H.; Pang, C., Capillarity-enhanced organ-attachable adhesive with highly drainable wrinkled octopus-inspired architectures. *ACS applied materials & interfaces* **2019**, *11* (29), 25674-25681.

27. Baik, S.; Park, Y.; Lee, T.-J.; Bhang, S. H.; Pang, C., A wet-tolerant adhesive patch inspired by protuberances in suction cups of octopi. *Nature* **2017**, *546* (7658), 396-400.

28. Kier, W. M.; Smith, A. M., The Morphology and Mechanics of Octopus Suckers. *The Biological Bulletin* **1990**, *178* (2), 126-136.

29. Chen, Y.-C.; Yang, H., Octopus-inspired assembly of nanosucker arrays for dry/wet adhesion.

ACS nano **2017**, *11* (6), 5332-5338.

30. Thanh-Vinh, N.; Takahashi, H.; Kan, T.; Noda, K.; Matsumoto, K.; Shimoyama, I. In *Micro suction cup array for wet/dry adhesion*, 2011 IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, IEEE: 2011; pp 284-287.

31. Kim, S. H.; Lee, S. G., Superhydrophobic/Superoleophobic Spray Coatings based on Photocurable Polyurethane Acrylate and Silica Nanoparticles. *Journal of Adhesion and Interface* **2020**, *21* (2), 58-64.