

PDPP3T 공액고분자의 광열효과를 이용한 자극감응성 하이드로젤 액추에이터의 반응속도 향상

최인혁 · 이동민 · 이원호[†] · 전석진[†]

금오공과대학교 고분자공학과

(2024년 05월 03일 접수, 2024년 05월 14일 수정, 2024년 05월 14일 채택)

Improvement of Response Time of Stimulus-responsive Hydrogel Actuator Using Photothermal Effect of PDPP3T Conjugated Polymer

In Hyeok Choi · Dongmin Lee · Wonho Lee[†] · Seog-Jin Jeon[†]

Department of Polymer Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology,
Gumi 39177, Republic of Korea

(Received May 03, 2024, Revised May 14, 2024; Accepted May 14, 2024)

요약: 소프트 액추에이터는 구성 재료 자체가 가지는 유연성과 부드러운 움직임으로 인해 의료 산업과 제조업 등 다양한 분야에서의 응용이 기대되고 있다. 자극감응성 하이드로젤은 유연하며 다양한 주위 자극에 의해 큰 부피 변화를 보일 수 있는 물질로서 소프트 액추에이터 재료로서 적합하다. 하지만, 자극감응성 하이드로젤의 부피 변화는 온도 변화의 속도 및 용매의 확산 속도에 기인하여 대부분의 작동 조건에서 느린 속도로 진행되며 이는 액추에이터의 반응속도를 제한한다. 본 연구에서는 온도감응성 하이드로젤인 polydiethylacrylamide에 광열효과를 가지는 공액고분자를 도입하여 빛에 의해 구동되는 소프트 액추에이터를 구현하였고, 공액고분자의 광열효과에 의한 반응속도의 개선효과를 조사하였다. 공액고분자의 도입에 의해 반응시간이 41% 개선됨을 확인하였고 이는 열전달 효율의 개선에 의한 것으로 짐작할 수 있다. 최종적으로 이러한 개선된 반응속도의 하이드로젤이 적용된 소프트 그리퍼를 제작하였고 반응속도를 조사하였다.

Abstract: Soft actuators can be applied to various fields such as the medical industry and manufacturing industry due to the flexibility and smooth movement resulted from their constituent materials. Stimuli-responsive hydrogels are a class of materials that can show large volume changes due to various surrounding stimuli and thus is suitable as a soft actuator material. However, because the change in volume of the stimuli-responsive hydrogel depends on the rate of temperature change and the rate at which the solvent diffuses into the polymer network, in most typical operating conditions, the response time of the actuator is slow due to inefficient heat transfer and diffusion process. In this study, a conjugated polymer was introduced into polydiethylacrylamide, a thermoresponsive hydrogel, to implement a soft actuator driven by light, and the improvement in response time by the photothermal effect of the conjugated polymer was investigated. It was confirmed that the response time was improved by 41% by the introduction of the conjugated polymer, due to the improvement in heat transfer efficiency. Finally, a soft gripper using the hydrogel with improved response time was fabricated and the response time of the gripper was investigated.

Keywords: Stimuli-responsive, Hydrogel, Photothermal, Conjugated polymer, Response time, Shape morphing

[†] Corresponding author: Seog-Jin Jeon (sjjeon@kumoh.ac.kr)
Wonho Lee (1holee@kumoh.ac.kr)

1. 서론

소프트 액추에이터는 하이드로젤 또는 탄성체 기반의 액추에이터로서 유연하며 생체적합성이 뛰어나고 인간과의 협업에 유리하여 의료 분야, 제조업 등 인체와 밀접 접촉 영역에서 기계적 모션을 통한 역할을 수행할 수 있다[1, 2]. 이를 위해 유연하며 기계적 모션의 구현이 가능한 유연 소재가 요구되며[3], 자극감응성 하이드로젤은 온도, 빛, 자기장, pH 등 다양한 외부 자극에 반응하여 10배 이상의 큰 부피 변화를 나타내는 물질로서 소프트 액추에이터의 모션을 구현하기 위한 재료로서 적합하다[4-6].

자극감응성 하이드로젤의 부피 변화는 외부 자극에 의한 친수성과 소수성 사이의 가역적 변환에 의하여 발생하며 온도감응성 하이드로젤의 경우 저임계 용액온도(LCST) 이상으로 상승할 때 친수성에서 소수성으로의 변화에 의해 부피 상전이가 발생한다[7]. 그러나, 온도감응성 하이드로젤의 부피 변화 속도는 온도의 변화 속도 및 물 분자의 확산 속도에 기인하므로 일반적인 열전달 조건에서 하이드로젤의 크기가 cm 이상의 크기일 경우 부피 상전이가 평형에 다다르는 시간은 24h 이상 소요될 수 있다. 약물 전달과 같은 분야에서는 느린 팽윤 거동이 장점으로 작용하기도 하지만 액추에이터로의 응용에서는 목적에 따라 때로는 빠르고 때로는 느린 반응속도를 요구하므로 이러한 요구를 만족시킬 수 있는 반응속도가 개선된 하이드로젤 액추에이터의 개발이 요구된다.

반응속도를 개선하기 위한 이전의 노력으로 다공성 구조의 도입[8], 정전기적 반발력의 도입[9,10], 광열효과의 이용[11,12] 등이 시도되어 왔다. 소금 결정, 실리카 입자, 고분자, 이산화탄소 가스 등의 포로젠(porogen)을 도입하여 다공성 구조를 형성하는 시도들이 있었으며 이렇게 형성된 다공성 구조는 물의 확산을 용이하게 하여 반응속도를 개선하는 데 기여한다[8]. 예를 들어, 산-염기 반응에 의해 생성된 이산화탄소 가스에 의해 평균 약 200 μm 의 기공이 형성된 아크릴아마이드 하이드로젤을 형성하였고, 이 초흡수성 하이드로젤은 15 s 내에 자기 질량의 300배에 해당하는 물을 흡수할 수 있음이 보고되었다[13]. 하이드로젤에 양전하 또는 음전하 이온 그룹을 도입하면 하이드로젤의 팽윤 과정에서 정전기적 반발력이 발생하여 더 큰 공동을 형성하며 이는 물의 확산을 돕는다. 아크릴산은 대표적인 음이온 그룹이며 하이드로젤과의 공중합시 함량에 의해 팽윤 정도와 속도를 조절할 수 있다[10]. 광열효과를 이용한 하이드로젤 액추에이터의 반응속도 개선을 위해 금 나노 입자, 탄소 나노튜브 등을 하이드로젤에 도입한 복합 물질에 대한 연구들이 진행된 바 있다[11,12]. 일반적인 가열은 액추에이터를 포함하는 환경 전체를 가열하는 반면 광열효과에 의한 발열은 액추에이터 내부에서 일어나므로 가열의 효율성이 높다. 예를 들어, 산화그래핀과 금나노입자

를 동시에 도입한 소프트 이중층 밴딩 액추에이터의 반응속도가 3.5배 개선되었음이 보고된 바 있다[14].

광열효과가 높은 물질의 다른 예로 공액고분자가 있다. 공여체-수용체 구조가 도입된 공액고분자 내에서는 전하 이동이 촉진되어 형광이 소광됨으로써 광열변환 효율이 증가하는 것으로 알려져 있다[15]. 공액고분자는 탄소 나노물질보다 합성이 용이하고 합성비용이 저렴한 반면 탄소 나노물질 또는 금속 나노물질과 비슷한 수준의 광열 변환 효율을 가진다[15,16]. 하지만, 공액고분자의 경우 광열효과를 이용한 치료용으로는 많이 사용되어온 반면 액추에이터에는 거의 적용되지 않았다. 우리는 치료용 용도로 사용된 바 있는 공액고분자를 온도감응성 하이드로젤에 도입하여 광열효과로 구동되는 하이드로젤 액추에이터를 제작하였다. 밴딩 방향이 제어된 하이드로젤 액추에이터에서 빛 조사 시간에 따른 밴딩 거동을 관찰하였고 반응속도의 개선 효과를 확인하였다. 또한 반응속도가 개선된 하이드로젤 액추에이터는 소프트 그리퍼에 적용될 수 있음을 보였고 반응속도의 개선 효과를 확인하였다.

2. 실험

2.1. 재료

Diethyl acrylamide (DEAM, >98%), p-methylstyrene (pMS, >96%), 5,5'-bis(trimethylstannyl)-thiophene (97%), 3,6-bis(5-bromo-2-thienyl)-2,5-dihydro-2,5-di(2'-hexyldecyl)-2,5-dihydro-pyrrolo-[3,4c]pyrrole-1,4-dione, Pd(PPh₃)₄ (98%), 1-propanol (>99.5%)은 TCI 케미칼에서 구입하였다. 1,4-dioxane (99.8%, 무수)는 알드리치에서 azobisisobutyronitrile (AIBN, 99%)은 준세이에서 구입하였다. Hexane (95%), methanol (99.8%), toluene (99.5%), acetone (99.8%), chloroform (99.5%)은 대정화학에서 구입하였다.

2.2. PDEAM-BP 합성

PDEAM-BP 하이드로젤과 PpMS-BP 고분자는 자유 라디칼 중합에 의해 합성되었다[17-19]. 둥근 바닥 플라스크에 23.58 mmol (3.24 ml)의 DEAM과 1.241 mmol (312 mg)의 acrylamidobenzophenone (AmBP), 82.77 μmol (13.59 mg)의 AIBN을 30 ml의 1,4-dioxane에 용해시킨 후 80°C, 250 rpm으로 20h 동안 중합하여 AmBP 함량이 5 mol%인 poly(diethylacrylamide-co-acrylamidobenzophenone) (PD-EAM-BP) 공중합 고분자를 합성하였다. AmBP는 이전 논문의 방법을 토대로 합성하였다[20]. 중합된 고분자를 hexane에 침전시키고 미 반응물을 제거한 뒤, 진공 오븐에서 하루 동안 건조하여 PDEAM-BP를 수득하였다. 합성된 고분자의 구조는 Fig. 1a와 같다.

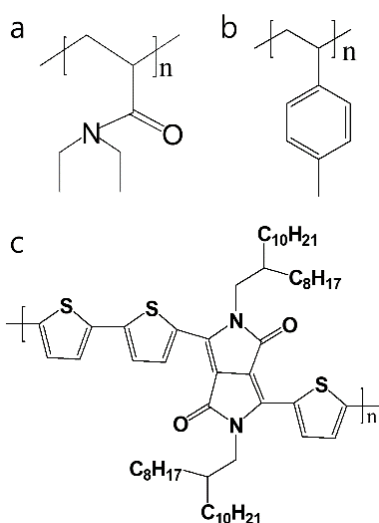


Figure 1. Chemical structure of (a) PDEAM-BP, (b) PpMS-BP, and (c) PDPP3T.

2.3. PpMS-BP 합성

PpMS 고분자는 자유 라디칼 중합으로 합성하였다. 26.72 mmol (3.344 ml)의 pMS와 1.336 mmol (0.335 g)의 AmBP와 89.07 μ mol (14.62 mg)의 AIBN을 30 ml의 1,4-dioxane에 용해시킨 후 80°C, 250 rpm으로 20h 동안 중합하여 AmBP 함량이 5 mol%인 poly(*p*-methylstyrene-co-acrylamidobenzophenone) (PpMS-BP)를 합성하였다. 중합된 고분자를 메탄올에 침전시켜 미반응물을 제거한 뒤, 진공 오븐에서 하루 동안 건조하여 PpMS-BP를 수득하였다. 합성된 고분자의 구조는 Fig. 1b와 같다.

2.4. 공액고분자 합성

공액고분자의 합성은 이전 문헌의 방법으로 합성하였다 [16]. 5,5'-Bis(trimethylstannyl)-thiophene 0.098 mmol (40 mg)과 3,6-bis(5-Bromo-2-thienyl)-2,5-dihydro-2,5-di(2'-hexyldecyl)-pyrrolo-[3,4c]pyrrole-1,4-dione 0.098 mmol (100 mg)을 two-neck 플라스크에 용존 산소가 제거된 톨루엔 10 ml와 함께 질소 분위기 하에서 혼합한다. 촉매 Pd(PPh₃)₄ 20 mg을 넣고 110°C에서 24h 중합시킨 후 상온에서 메탄올에 침전시켜준다. 메탄올, 아세톤, 헥산, 클로로포름에서 각 6~12h씩 Soxhlet extraction으로 단량체 및 불순물을 제거해 준다. 마지막으로 컬럼 크로마토그래피로 촉매를 제거한다. 합성된 고분자의 명칭은 Poly{2,2'-[(2,5-bis(2-hexyldecyl)-3,6-dioxo-2,3,5,6-tetrahydropyrrolo[3,4-c]pyrrole 1,4-diyl)dithiophene]-5,5'-diyl-alt-thiophen-2,5-diyl} (PDPP3T)이며, 구조는 Fig. 1c와 같다.

2.5. 용액 제조

하이드로젤, 공액고분자의 혼합액과 비교군인 순수 하이

드로젤을 최소 30 m 이상 초음파 처리를 이용해 클로로포름에 용해시키고 볼텍스 믹서로 혼합했다. 혼합액은 하이드로젤과 공액고분자가 95:5의 비율로 혼합하였고 PCP5라고 명하였다.

2.6. 패턴 구조 형성

반응속도를 측정하기 위해 하이드로젤 또는 하이드로젤과 공액고분자의 복합 필름을 4 μ m의 두께로 드롭 캐스팅하였고, 디지털 마이크로미러 장치(Polygon, Mightex 400)로 365 nm의 UV를 300 μ m 지름의 원패턴으로 조사하여 광경화하였다. 밴딩 거동을 분석하기 위해서 밴딩의 방향을 한 방향으로 제어하였고, 이를 위해 PDEAM-BP의 직사각 패턴 위에 PpMS-BP의 스트라이프 패턴을 직사각형의 길이 방향과 평행하게 형성하였다. 그리퍼를 제조하기 위해서 위의 패턴을 4개의 팔에 형성하였다.

2.7. 측정

고분자의 분자량은 GPC를 이용하여 측정하였고(JP/LC-20AD, Shimadzu), 공액고분자의 흡수 파장을 확인하기 위해 UV-VIS 흡수 스펙트럼(UV-1900, Shimadzu)을 측정하였다. 하이드로젤 액추에이터의 온도로 인한 수축 또는 팽윤 거동을 관찰하기 위해 온도조절 스테이지(LNP 95, T95-HS, Linkam)를 이용하여 0°C에서 60°C로 온도 상승 또는 60°C에서 0°C로 온도 하강 조건에서 샘플을 현미경 하에서 관찰하였다. 빛에 의한 거동을 관찰할 때는 0°C를 유지하고 808 nm의 레이저를 3 W/cm²의 세기로 조사했으며 샘플과 광원의 거리는 모든 측정에서 12 cm로 일정하게 유지하였다.

3. 결과 및 토론

하이드로젤 액추에이터를 제작하기 위해 합성된 PDEAM-BP, PpMS-BP, PDPP3T의 구조를 Fig. 1에 각각 나타냈다. 각 고분자들의 수평균 분자량은 PDEAM-BP, PpMS-BP, PDPP3T에 대해서 각각 39,100, 20,800, 23,400 g/mol이었고, 다분산도는 각각 1.44, 1.61, 2.60이었다. 고분자의 밀도는 각각 PDEAM-BP는 0.97 g/ml, PpMS-BP는 1.04 g/ml이며, PDPP3T에 대해서는 알려진 문헌값이 존재하지 않았다. PDEAM-BP와 PpMS-BP에 공중합되어 있는 BP 분자는 UV에 의해 가교를 형성할 수 있는 분자로서 자극감응성 하이드로젤인 PDEAM-BP와 유리상 고분자인 PpMS-BP 사이의 결합을 가능하게 할 뿐 아니라 여러 차례의 액추에이션 후에도 안정한 결합을 유지할 수 있도록 한다[21]. PDPP3T의 흡수는 825 nm의 파장에서 최대값을 가지고 (Fig. 2a), 광원으로 사용된 레이저의 파장인 808 nm에서도 825 nm에서의 흡광도의 95.6%를 유지하여 광원의 빛을 효율적으로 흡수하여 광열효과를 나타낼 것으로 기대할 수 있

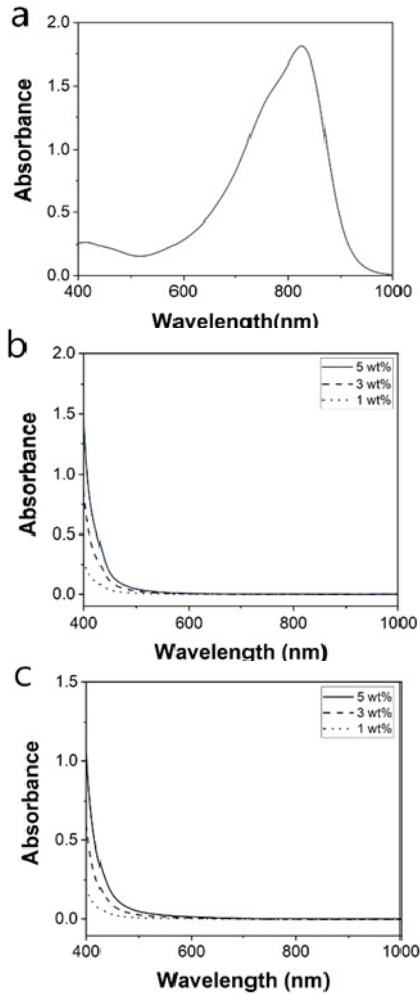


Figure 2. Absorption spectrum of (a) PDPP3T, (b) PDEAM-BP, and (c) PpMS-BP.

다. 반면, PDEAM-BP(Fig. 2b)와 PpMS-BP(Fig. 2c)는 레이저 파장에서 흡수를 거의 일으키지 않으므로 레이저 빛의 대부분은 PDPP3T에 의해 흡수될 것으로 짐작할 수 있다.

우리는 공액고분자가 도입된 하이드로젤 필름의 빛에 의한 거동을 조사하기에 앞서 공액고분자의 복합 필름 내에서의 분산상태를 조사하였다. 공액고분자의 농도를 5, 10, 15, 20 wt%로 제어했을 때 필름의 표면을 광학현미경으로 관찰한 결과 5 wt%에서는 공액고분자가 5 μm 미만의 비교적 작은 응집을 이루면서 균일하게 분산되었으나 10 wt%에서는 응집체의 크기가 50 μm 이상으로 증가하였고, 15 wt% 이상의 농도에서는 응집체의 크기가 300 μm 이상으로 크게 증가했으며 분산이 매우 불균일하게 변화하였다(Fig. 3). 공액고분자는 고유의 pi-pi 결합에 의해 뭉침 현상을 유발할 수 있는데, 드롭 캐스팅하는 과정에서 농도에 따른 뭉침 현상이 증가한 것으로 보인다. 10 wt% 이상의 농도에서는 뭉침 현상이 심하였으므로 5 wt%의 농도에서 실

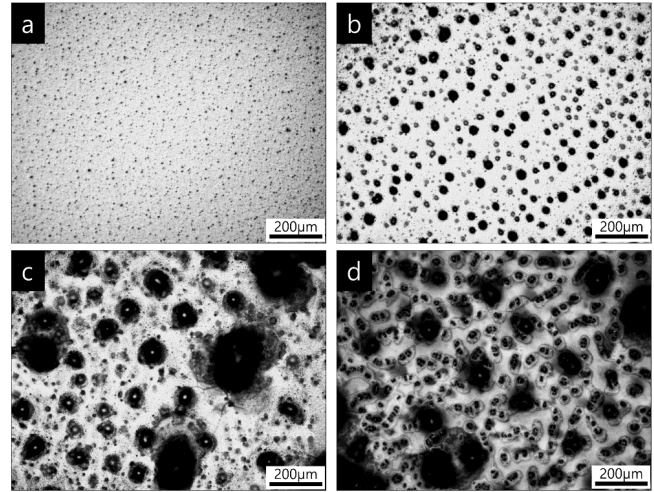


Figure 3. Optical images of composite films of PDEAM-BP and conjugated polymer according to the content of conjugated polymer: (a) 5 wt%, (b) 10 wt%, (c) 15 wt%, and (d) 20 wt%.

험을 진행하였고 5 wt%의 공액고분자가 도입된 복합 필름을 편의상 PCP5로 명명하였다. PCP5로 제작한 액추에이터의 경우 최대 50번의 구동에서 눈에 띄는 결함이나 동작의 불균일성이 발견되지 않았으나 장기적인 구동에서의 안정성을 위해서 PCP5의 뭉침 현상을 줄이는 연구를 후속 연구로 진행중에 있다.

순수한 하이드로젤의 반응속도와 PCP5의 반응속도를 비교하기 위해서 PDEAM-BP 또는 PCP5를 두께 4 μm 지름 300 μm 의 원형으로 패터닝하였다. 하이드로젤의 반응속도는 구조체의 크기에 연관되므로 반응속도 측정을 위한 샘플의 두께 및 지름은 모든 실험에서 일관되게 유지하였다. 순수 하이드로젤의 수축 과정에서의 팽윤비 변화는 0°C에서 60°C로 승온과정에서 시간에 따른 샘플의 지름을 측정 한 후 가장 작게 축소된 상태에서의 지름으로 나누었다(Fig. 4a, 흰색원). 팽윤 과정에 대한 팽윤비는 60°C에서 0°C의 승온과정에 대해서 같은 방법으로 도출하였다(Fig. 4b, 흰색원). 공액고분자의 광열효과 도입에 의한 반응속도 변화를 비교 분석하기 위해서 PCP5의 원형 패턴을 제작하였고, 수축 과정에 대해서는 온도를 온도조절 스테이지로 0°C를 유지하면서 광원을 조사하여 시간에 따른 지름을 측정 한 후 가장 작게 수축된 상태에서의 지름으로 나누어 수축 과정에 대한 팽윤비를 도출하였다(Fig. 4a, 검은원). 팽윤 과정에 대해서는 최대 수축상태에서 10 m 대기하여 평형에 이르게 한 다음 온도를 0°C로 감온하면서 팽윤비를 도출하였다(Fig. 4b, 검은원). 순수 PDEAM-BP와 PCP5에 대해서 최대 팽윤비는 각각 1.227, 1.202의 값을 나타내었다. PCP5의 경우에는 하이드로젤의 일부가 부피 변화를 나타내지 않는 공액고분자로 대체되었으므로 최대 팽윤비가 작아지는 결과를 보인 것으로 이해할 수 있고, 그 차이는 대략 10%였

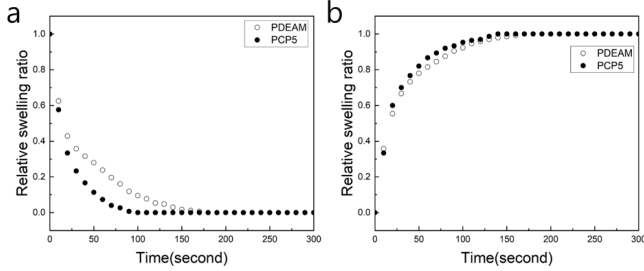


Figure 4. Comparison of the relative swelling ratio between PDEAM-BP and PCP5 according to time for (a) deswelling and (b) swelling.

다. 순수 하이드로젤은 완전 수축 상태에 도달하는데 약 170s의 시간이 걸린 반면, PCP5는 약 100s의 시간이 걸려 41%의 수축 속도 개선 효과를 나타내었다(Fig. 4a). 반면 팽윤 과정에서는 순수 PDEAM이 완전 팽윤 상태에 도달하는데 약 170s, PCP5는 약 130s의 시간이 걸려 23%의 반응 속도 개선이 관찰되었다(Fig. 4b).

수축에서의 반응속도 개선 효과는 온도조절 스테이지를 이용한 경우 외부 온도를 높여야 하는 간접 가열 방식보다 샘플 내의 공액고분자를 직접 가열하는 광열효과가 가열 방식에서 보다 효율적인 것으로 유추할 수 있다. 반면, 우리는 광열효과가 작용하지 않는 팽윤 과정에서도 반응속도가 20% 이상 개선된 것을 확인하였다. 온도조절 스테이지 방식의 경우 전체 시스템의 온도를 60°C까지 높인 상태였으므로 팽윤을 위해 다시 전체 시스템의 온도를 0°C로 낮추어야 하는 반면, 광열효과 제어 방식에서는 샘플을 국부적으로만 가열하였으므로 전체 시스템의 온도가 더 빠르게 0°C로 감온되어 팽윤이 빠르게 일어났을 것으로 유추할 수 있다.

개선된 반응속도를 가진 광열효과가 적용된 하이드로젤을 소프트 액추에이터에 적용하기 위해 온도에 의한 밴딩 거동을 관찰하였다. 밴딩의 방향을 제어하기 위해서 직사각형의 하이드로젤층에 유리상 고분자인 PpMS-BP의 선형 패턴을 직사각형의 길이 방향으로 패턴하였고, 유리상 고분자의 패턴 개수에 따라서 다른 정도의 밴딩이 구현됨을 확인하였다. PCP5 층의 길이 및 폭은 각각 300 μm , 50 μm 로 제작하였고, 선형 패턴의 길이 및 폭은 각각 300 μm , 5 μm 로 제작하였다. 1개의 선형 패턴 형성 시 가운데에 위치하였고, 2개의 선형 패턴 형성 시 패턴의 중심 간 거리를 25 μm 로 하였고, 3개의 선형 패턴 형성 시 패턴의 중심 간 거리를 20 μm 로 하였다(Inset of Fig. 5a).

0°C로 온도를 낮추었을 때 선형 패턴의 개수가 1개인 경우에는 0.0119 μm^{-1} 의 곡률을 가졌고, 선형 패턴의 개수가 2개, 3개로 늘어남에 따라 더 커진 곡률인 0.0137 μm^{-1} , 0.0165 μm^{-1} 를 나타내었다(Fig. 5a). 선형 패턴의 개수가 2개

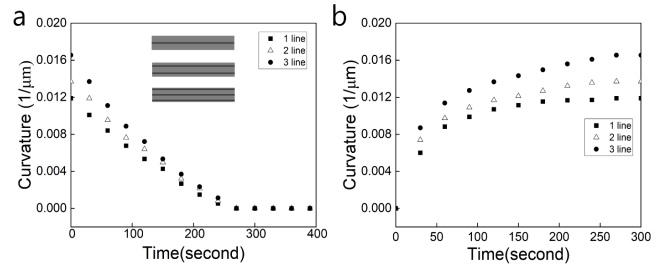


Figure 5. Curvature versus time graph according to the number of PpMS-BP patterns for (a) deswelling and (b) swelling. Inset in (a) is schematics of the composite hydrogel films with 1-3 patterns of PpMS-BP on their surface.

이상인 경우, 0°C로 온도를 낮출 경우 끝과 끝이 닿을 정도로 충분한 밴딩을 나타내었다. 패턴의 개수가 많아짐에 따라 곡률은 더 커지는 것이 관찰되었고 이는 두 물질 간 변형률 차이가 커지기 때문으로 이해할 수 있다. 선형 패턴의 개수와 상관없이 최대 곡률에 이르는 데에는 약 300s가 소요되었다. 밴딩 상태에서 레이저를 조사하면 곡률은 작아지며 곡률을 완전히 잃고 평평한 상태가 되는데 약 270s가 소요되었다(Fig. 5b).

우리는 선형 패턴의 도입을 통해 곡률을 제어할 수 있음을 이용하여 소프트 그리퍼를 제작하였다. 소프트 그리퍼는 유연하고 부드러운 특성에 의해 해파리 또는 부드러운 과일류 등 외부 힘에 취약한 물질들을 손상 없이 집을 수 있는 장점이 있어 하드 기계 로봇의 취약한 부분을 보완할 수 있음이 보고되었다[22,23]. 소프트 그리퍼는 길이 300 μm , 폭 50 μm 의 직사각형이 교차하는 십자가 모양으로 제작하였고, 네 개의 팔에 PpMS-BP 선형 패턴을 25 μm 간격으로 2개 도입하였다(Fig. 6a). Fig. 6b의 가장 왼쪽 그림과 같이 0°C에서 네 개의 팔은 완전히 오므려져 서로 접촉하여 물건을 집을 수 있는 상태가 되었다. 0°C에서 충분한 열적 평형에 도달하여 네 개의 팔이 완전히 접촉한 상태에서 레이저를 조사하면 그리퍼의 네 팔이 퍼지기 시작하여 270s에 완전히 퍼졌다(Fig. 6b). 그리퍼의 네 팔이 완전히 퍼진 상태에서 레이저를 조사를 중지하면 300s에 완전히 펼쳐짐을 확인하였다(Fig. 6c). 소프트 그리퍼의 반응속도는 Fig.

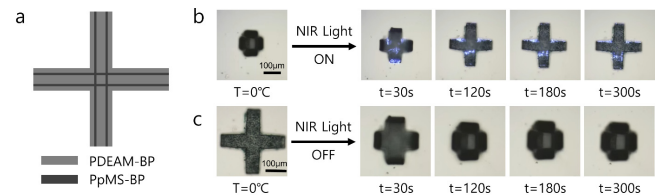


Figure 6. (a) A schematic of the soft gripper and time dependent shape change of the soft gripper (b) upon NIR laser irradiation and (c) after turning off the laser.

5에서 나타낸 하이드로젤과 공액고분자의 복합 필름의 반응속도와 같음을 확인할 수 있었다. 우리는 본 연구에서 제작한 소프트 그리퍼를 이용해 물체를 집어 올리는 등의 기능을 수행할 수 있을 것으로 기대하며 기존의 유선 구동 그리퍼와 비교할 때 전원 연결 및 배터리의 탑재가 요구되지 않으므로 기기의 소형화 및 경량화가 가능할 것으로 기대한다.

4. 결론

온도 감응성 하이드로젤인 PDEAM-BP에 공액고분자를 도입함으로써 광열효과에 의한 하이드로젤의 수축과 팽윤 과정에서의 반응속도 개선 효과를 조사하였다. 순수 하이드로젤과 비교해서 광열효과가 도입된 액추에이터는 수축 및 팽윤에서의 반응속도가 각각 41%, 23% 개선되었다. 이는 공액고분자가 빛에 의해 하이드로젤의 내부에서 발열하여 외부 가열 방식에 비해 보다 높은 가열 효율성을 갖기 때문으로 이해할 수 있다. 이러한 광열효과 제어 방식은 일반적인 액추에이터의 유선 구동 방식과 달리 무선 구동이 가능하며 작동을 위한 전원을 필요로 하지 않으므로 장치의 소형화 및 경량화가 가능하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 금 나노물질이나 탄소 나노물질보다 합성 비용이 저렴한 공액고분자의 광열효과로 구동이 가능한 하이드로젤 액추에이터의 제작이 가능성을 나타내어 경제적이며 현실적인 소프트 액추에이터의 제작 가능성에 대해서 보고한다.

Acknowledgement

이 연구는 2022년 국립금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음.

References

1. M. Runciman, A. Darzi, and G. P. Mylonas, *Soft Robot.*, **6**, 423 (2019).
2. N. El-Atab, R. B. Mishra, F. Al-Modaf, L. Joharji, A. A. Alsharif, H. Alamoudi, M. Diaz, N. Qaiser, and M. M. Hussain, *Adv. Intell. Syst.*, **2**, 2000128 (2020).
3. I. Apsite, S. Salehi, and L. Ionov, *Chem. Rev.*, **122**, 1349 (2022).
4. S. Ahn, R. M. Kasi, S.-C. Kim, N. Sharma, and Y. Zhou, *Soft Matter*, **4**, 1151 (2008).
5. S.-J. Jeon, A. W. Hauser, and R. C. Hayward, *Acc. Chem. Res.*, **50**, 161 (2017).
6. M. Neumann, G. di Marco, D. Iudin, M. Viola, C. F. van Nostrum, B. G. P. van Ravensteijn, and T. Vermonden, *Macromolecules*, **56**, 8377 (2023).
7. Y. Li, and T. Tanaka, *J. Chem. Phys.*, **92**, 1365 (1990).
8. R. Foudazi, R. Zowada, I. Manas-Zloczower, and D. L. Feke, *Langmuir*, **39**, 2092 (2023).
9. J. E. Elliott, M. Macdonald, J. Nie, and C. N. Bowman, *Polymer*, **45**, 1503 (2004).
10. J. Ren, N. Zhan, J. Yang, and X. Xiang, *Macromol. Chem. Phys.*, **224**, 2300266 (2023).
11. S. Liu, H. Liang, and Y. Yin, *Device*, **2**, 100330 (2024).
12. B. Han, Y. Zhang, Q. Chen, and H. Sun, *Adv. Funct. Mater.*, **28**, 1802235 (2018).
13. H. Choudhary, and S. R. Raghavan, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **14**, 13733 (2022).
14. Y. Yang, Y. Liu, and Y. Shen, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 1910172 (2020).
15. Y. Wang, H.-M. Meng, G. Song, Z. Li, and X.-B. Zhang, *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2**, 4258 (2020).
16. S. Li, X. Wang, R. Hu, H. Chen, M. Li, J. Wang, Y. Wang, L. Liu, F. Lv, X.-J. Liang, and S. Wang, *Chem. Mater.*, **28**, 8669 (2016).
17. S. Jeon, M. C. Chiappelli, and R. C. Hayward, *Adv. Funct. Mater.*, **26**, 722 (2016).
18. S. Jeon, and R. C. Hayward, *Adv. Mater.*, **29**, 1606111 (2017).
19. S.-J. Jeon and R. C. Hayward, *Soft Matter*, **16**, 688 (2020).
20. J. Jia, M. Sarker, M. G. Steinmetz, R. Shukla, and R. Rathore, *J. Org. Chem.*, **73**, 8867 (2008).
21. S. K. Christensen, M. C. Chiappelli, and R. C. Hayward, *Macromolecules*, **45**, 5237 (2012).
22. N. R. Sinatra, C. B. Teeple, D. M. Vogt, K. K. Parker, D. F. Gruber, and R. J. Wood, *Sci. Robot.*, **4**, eaax5425 (2019).
23. K. Becker, C. Teeple, N. Charles, Y. Jung, D. Baum, J. C. Weaver, L. Mahadevan, and R. Wood, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **119**, e2209819119 (2022).