



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0114445
(43) 공개일자 2022년08월17일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C08F 212/14 (2006.01) A61F 2/08 (2006.01)
A61F 2/50 (2006.01) A61F 2/68 (2006.01)
A61F 2/74 (2006.01) C08F 220/06 (2006.01)
C08F 220/28 (2006.01) C08F 220/56 (2006.01)
C08J 3/075 (2006.01) F03G 7/00 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
C08F 212/30 (2022.08)
A61F 2/08 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2021-0045688
(22) 출원일자 2021년04월08일
심사청구일자 2021년04월08일
- (30) 우선권주장
102010017292 2021년02월08일 대한민국(KR)
- (71) 출원인
충남대학교산학협력단
대전광역시 유성구 대학로 99 (공동, 충남대학교)
- (72) 발명자
김소연
대전광역시 서구 둔산남로 127 목련아파트 205동 902호
신예린
경기도 여주시 강천면 마감로 313
최중선
충청남도 부여군 부여읍 금성로 20 동남아파트 7동 303호
- (74) 대리인
특허법인 플러스

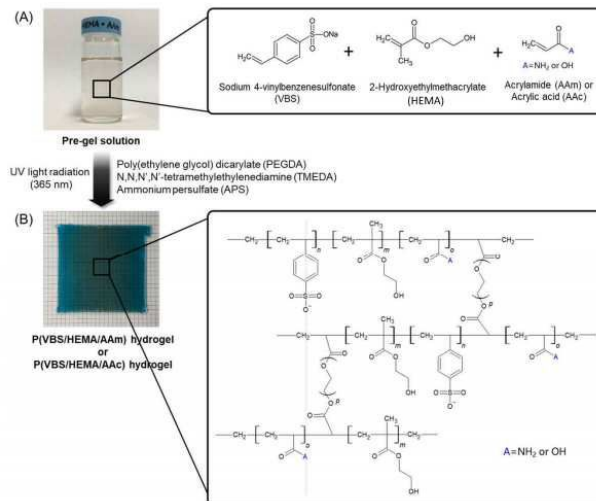
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 발명의 명칭 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터 및 이의 제조방법

(57) 요약

본 발명은 전기장 감응성 액추에이터 및 이의 제조방법에 관한 것으로, 더 상세하게는 10V 이하의 낮은 전압인가에 의한 전기장에서 접합변형이 가능한 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터 및 이의 제조방법에 관한 것이다. 구체적으로, 상기 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터는 설포네이트기를 포함하는 중합성 단량체; 히드록실기를 포함하는 아크릴 단량체; 수용성 아크릴계 단량체; 및 다관능성 단량체;를 포함하는 중합성 조성물로부터 제조된다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

A61F 2/68 (2021.01)
A61F 2/74 (2021.08)
C08F 220/06 (2013.01)
C08F 220/28 (2022.08)
C08F 220/286 (2020.02)
C08F 220/56 (2013.01)
C08J 3/075 (2013.01)
F03G 7/005 (2013.01)
A61F 2002/5066 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	2019029845
과제번호	2018R1A2B6008850
부처명	미래부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	중견연구/ 개인연구
연구과제명	근적외선 민감성 상향변환 나노구조체를 이용한 심부암의 고효율 영상진단 및 광역
학적치료시스템의 개발	
기 여 율	1/1
과제수행기관명	충남대학교 산학협력단
연구기간	2018.03.01 ~ 2021.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

설폰네이트기를 포함하는 중합성 단량체; 히드록실기를 포함하는 아크릴 단량체; 수용성 아크릴계 단량체; 및 다관능성 단량체;를 포함하는 중합성 조성물로부터 제조되는 접힘변형이 가능한, 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 설폰네이트기를 포함하는 중합성 단량체는 방향족 비닐계 단량체인, 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 히드록실기를 포함하는 아크릴 단량체는 히드록시알킬(메타)아크릴레이트인, 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 수용성 아크릴계 단량체는 (메타)아크릴산 또는 아크릴아미드인, 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 중합성 단량체 : 상기 아크릴 단량체 : 상기 수용성 아크릴계 단량체의 몰비는 1 : 2~15 : 2~10인, 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 중합성 단량체 : 상기 아크릴 단량체 : 상기 수용성 아크릴계 단량체의 몰비는 1 : 3~7 : 3~7인, 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터.

청구항 7

제5항에 있어서,

상기 중합성 조성물은 상기 중합성 단량체, 아크릴 단량체 및 수용성 아크릴계 단량체를 포함하는 조성물 100 몰에 대하여, 상기 다관능성 단량체 0.12 내지 0.5몰 함유하는, 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터.

청구항 8

제1항에 있어서,

0.01M 농도의 염화나트륨 용액 내 이격간격이 40mm인 두 전극 사이에 함침된 두께 1 내지 2mm 및 길이 15mm의 상기 액추에이터는, 10V 전압 인가 시, 90초 이내에서 하기 식 1에 따른 굽힘변형 평균속도가 $0.7^{\circ}/s$ 이상인, 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터.

[식 1]

굽힘변형 평균속도($^{\circ}/s$) = $\Delta R / \Delta t$

(상기 식 1에서, 상기 Δt 는 상기 전극에 전압을 인가한 시간, 상기 ΔR 은 초기 하이드로겔을 기준으로, 측정 시점에서 측정된 하이드로겔의 굽힘(bending) 각도)

청구항 9

제1항에 있어서,

0.01M 농도의 염화나트륨 용액 내 이격간격이 40mm인 두 전극 사이에 함침된 두께 1 내지 2mm 및 길이 15mm의 상기 액추에이터는, 10V 전압 인가 시, 최대 굽힘각도가 100° 이상인, 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 액추에이터는 10V 이하의 낮은 전압에서 굽힘변형 가능한, 전기장 감응성 액추에이터.

청구항 11

제1항에 있어서,

상기 액추에이터는 0.01M 내지 0.03M 농도의 염화나트륨 용액에서 최대 굽힘각도를 가지는, 전기장 감응성 액추에이터.

청구항 12

제4항에 있어서,

상기 수용성 아크릴계 단량체가 (메타)아크릴산이며,

0.01M 농도의 염화나트륨 용액 내 이격간격이 40mm인 두 전극 사이에 함침된 두께 1 내지 2mm 및 길이 15mm의 상기 액추에이터는, 하기 식 2에 따른 전압에 대한 굽힘각도의 변형도가 1.2 내지 $1.6^{\circ}/V$ 인, 전기장 감응성 액추에이터.

[식 2]

전압에 대한 굽힘각도의 변형도 ($^{\circ}/V$) = $\Delta R / \Delta V$

(상기 식 2에서, 상기 ΔV 는 상기 전극에 인가되는 전압, 상기 ΔR 은 초기 하이드로겔을 기준으로, 특정 전압에서 측정된 하이드로겔의 굽힘(bending) 각도)

청구항 13

(S1) 설포네이트기를 포함하는 중합성 단량체, 히드록실기를 포함하는 아크릴 단량체, 수용성 아크릴계 단량체 및 다관능성 단량체를 포함하는 중합성 조성물을 준비하는 단계; 및

(S2) 상기 중합성 조성물을 중합시켜 하이드로겔을 제조하는 단계;를 포함하는, 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터의 제조방법.

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 중합성 단량체는 방향족 비닐계 단량체이며,

상기 아크릴 단량체는 히드록시알킬(메타)아크릴레이트이고,

상기 수용성 아크릴계 단량체는 (메타)아크릴산 또는 아크릴아미드인, 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터의 제조방법.

청구항 15

제13항에 있어서,

상기 (S2)단계의 중합온도는 4℃ 내지 30℃인 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터의 제조방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터 및 이의 제조방법에 관한 것으로, 더 상세하게는 비교적 낮은 전압에 의한 전기장에서 접힘변형이 가능한 전기자극 하이드로겔 및 이의 제조방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 하이드로겔은 일반적으로 다량의 수분을 함유할 수 있는 삼차원의 친수성 고분자 망상구조를 가진 물질을 의미한다. 고분자 네트워크 구조에 존재하는 기능성 그룹의 종류에 따라 다양한 기능을 보여주는데, 이러한 기능성 그룹을 하이드로겔에 도입함으로써 온도, pH, 용매, 자기장 및 전기장 등과 같은 자극 등에 상당히 뚜렷하고 빠르게 반응하는 자극 감응형 고분자 하이드로겔에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다

[0003] 그 중 하나로 전기장 감응성 하이드로겔은 전기장에 의해 팽윤과 수축이 가능한 하이드로겔로써 전류가 하이드로겔의 감응을 유발할 수 있는 외부 자극으로 사용된다. 전류에 의해 생성된 전기장은 하이드로겔의 수축과 팽윤, 굽힘 등의 다양한 형태의 변화를 나타나게 하고, 이러한 고분자 하이드로겔은 약물전달시스템, 생체근육과 유사한 인공근육 등 여러 분야에 응용할 수 있는 소프트 액추에이터로써 사용할 수 있으며, 이를 위한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다.

[0004] 대한민국 등록특허공보 제10-1424172호에는 '전기장 감응성 하이드로겔, 그를 이용한 약물전달체 및 그의 제조방법'이 개시되어 있다. 상기 문헌에는 폴리비닐알코올에 아크릴산계 단량체를 혼합하고 라디칼 중합을 통해 IPN형태의 하이드로겔을 제조하였으며, 아크릴산계 단량체에 비닐 술포산계 단량체 및 탄소재료를 첨가하여 강도 및 전기장 감응성을 향상시키고자 하였다.

[0005] 하지만, 전기장 감응효과를 보기 위해선, 30V 이상의 높은 전압이 요구되며, 고가의 탄소재료로 이루어짐에 따라, 제조단가가 높아 산업성이 낮으며, 이에, 적용분야가 매우 협소하다는 단점이 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0006] (특허문헌 0001) (특허 문헌 1) : 대한민국 등록특허공보 제10-1424172호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명의 목적은 10V 이하의 낮은 전압에 의한 전기장에서 접힘 변형이 가능한 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터를 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0008] 본 발명에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터는 설포네이트기를 포함하는 중합성 단량체; 히드록실기를 포함하는 아크릴 단량체; 수용성 아크릴계 단량체; 및 다관능성 단량체;를 포함하는 중합성 조성물로부터 제조되며, 접힘변형이 가능하다.

[0009] 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터에 있어서, 상기 설포네이트기를 포함하는 중합성 단량체는 방향족 비닐계 단량체일 수 있다.

[0010] 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터에 있어서, 상기 히드록실기를 포함하는 아크릴 단량체는 히드록시알킬(메타)아크릴레이트일 수 있다.

[0011] 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터에 있어서, 상기 수용성 아크릴계 단량체는 (메타)아크릴산 또는 아크릴아미드일 수 있다.

- [0012] 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터에 있어서, 상기 중합성 단량체 : 상기 아크릴 단량체 : 상기 수용성 아크릴계 단량체의 몰비는 1 : 2~15 : 2~10일 수 있다.
- [0013] 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터에 있어서, 상기 중합성 단량체 : 상기 아크릴 단량체 : 상기 수용성 아크릴계 단량체의 몰비는 1 : 3~7 : 3~7일 수 있다.
- [0014] 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터에 있어서, 상기 중합성 조성물은 상기 중합성 단량체, 아크릴 단량체 및 수용성 아크릴계 단량체를 포함하는 조성물 100 몰에 대하여, 상기 다관능성 단량체 0.12 내지 0.5몰 함유할 수 있다.
- [0015] 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터에 있어서, 0.01M 농도의 염화나트륨 용액 내 이격간격이 40mm인 두 전극 사이에 함침된 두께 1 내지 2mm 및 길이 15mm의 상기 액추에이터는, 10V 전압 인가 시, 90초 이내에서 하기 식 1에 따른 굽힘변형 평균속도가 $0.7^{\circ} / \text{s}$ 이상일 수 있다.
- [0016] [식 1]
- [0017] $\text{굽힘변형 평균속도} (^{\circ} / \text{s}) = \Delta R / \Delta t$
- [0018] (상기 식 1에서, 상기 Δt 는 상기 전극에 전압을 인가한 시간, 상기 ΔR 은 초기 하이드로겔을 기준으로, 측정 시점에서 측정된 하이드로겔의 굽힘(bending) 각도)
- [0019] 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터에 있어서, 0.01M 농도의 염화나트륨 용액 내 이격간격이 40mm인 두 전극 사이에 함침된 두께 1 내지 2mm 및 길이 15mm의 상기 액추에이터는, 10V 전압 인가 시, 최대 굽힘각도가 100° 이상일 수 있다.
- [0020] 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터에 있어서, 상기 액추에이터는 10V 이하의 낮은 전압에서 굽힘변형이 가능할 수 있다.
- [0021] 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터에 있어서, 상기 액추에이터는 0.01M 내지 0.03M 농도의 염화나트륨 용액에서 최대 굽힘각도를 가질 수 있다.
- [0022] 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터에 있어서, 상기 수용성 아크릴계 단량체가 (메타)아크릴산이며, 0.01M 농도의 염화나트륨 용액 내 이격간격이 40mm인 두 전극 사이에 함침된 두께 1 내지 2mm 및 길이 15mm의 상기 액추에이터는, 하기 식 2에 따른 전압에 대한 굽힘각도의 변형도가 1.2 내지 $1.6^{\circ} / \text{V}$ 일 수 있다.
- [0023] [식 2]
- [0024] $\text{전압에 대한 굽힘각도의 변형도} (^{\circ} / \text{V}) = \Delta R / \Delta V$
- [0025] (상기 식 2에서, 상기 ΔV 는 상기 전극에 인가되는 전압, 상기 ΔR 은 초기 하이드로겔을 기준으로, 특정 전압에서 측정된 하이드로겔의 굽힘(bending) 각도)
- [0026] 본 발명에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터의 제조방법은 (S1)설폰네이트기를 포함하는 중합성 단량체, 히드록실기를 포함하는 아크릴 단량체, 수용성 아크릴계 단량체 및 다관능성 단량체를 포함하는 중합성 조성물을 준비하는 단계; 및 (S2)상기 중합성 조성물을 중합시켜 하이드로겔을 제조하는 단계;를 포함한다.
- [0027] 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터의 제조방법에 있어서, 상기 중합성 단량체는 방향족 비닐계 단량체이며, 상기 아크릴 단량체는 히드록시알킬(메타)아크릴레이트이고, 상기 수용성 아크릴계 단량체는 (메타)아크릴산 또는 아크릴아미드일 수 있다.
- [0028] 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터의 제조방법에 있어서, 상기 (S2)단계의 중합 온도는 4°C 내지 30°C 일 수 있다.
- 발명의 효과**
- [0029] 본 발명에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터는 설폰네이트기를 포함하는 중합성 단량체 및 히드록실기를 포함하는 아크릴 단량체에 수용성 아크릴계 단량체를 포함함에 따라, 10V 이하의 낮은 전압 인가에 따라 형성된 전기장에서 접힘변형이 가능하다.
- [0030] 또한, 본 발명에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터는 높은 함수율 및 우수한 기계적 강도를 가짐과 동

시에 생체안정성을 나타냄에 따라, 생체적합성 재료로 사용이 가능하며, 의료기기, 바이오 모방 로봇, 바이오 센서, 웨어러블 스마트 기기 관련 분야에 적용이 가능한 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

- [0031] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터를 도시한 사진,
 도 2는 도 1에 도시된 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터의 적외선분광법(FT-IR) 측정 결과,
 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터의 겔분율 측정 결과,
 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터의 함수율 측정 결과,
 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터의 염화나트륨 용액 내 함수율 측정 결과,
 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터의 기계적 강도 측정 결과,
 도 7 내지 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터의 전기장 감응성 측정 결과,
 도 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터의 세포독성 측정 결과이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0032] 본 명세서에서 사용되는 기술 용어 및 과학 용어에 있어서 다른 정의가 없다면, 이 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 통상적으로 이해하고 있는 의미를 가지며, 하기의 설명 및 첨부 도면에서 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 공지 기능 및 구성에 대한 설명은 생략한다.
- [0033] 또한, 본 명세서에서 사용되는 단수 형태는 문맥에서 특별한 지시가 없는 한 복수 형태도 포함하는 것으로 의도할 수 있다.
- [0034] 또한, 본 명세서에서 특별한 언급 없이 사용된 단위는 중량을 기준으로 하며, 일 예로 % 또는 비의 단위는 중량 % 또는 중량비를 의미하고, 중량%는 달리 정의되지 않는 한 전체 조성물 중 어느 하나의 성분이 조성물 내에서 차지하는 중량%를 의미한다.
- [0035] 또한, 본 명세서에서 사용되는 수치 범위는 하한치와 상한치와 그 범위 내에서의 모든 값, 정의되는 범위의 형태와 폭에서 논리적으로 유도되는 증분, 이중 한정된 모든 값 및 서로 다른 형태로 한정된 수치 범위의 상한 및 하한의 모든 가능한 조합을 포함한다. 본 발명의 명세서에서 특별한 정의가 없는 한 실험 오차 또는 값의 반올림으로 인해 발생할 가능성이 있는 수치범위 외의 값 역시 정의된 수치범위에 포함된다.
- [0036] 본 명세서의 용어, '포함한다'는 '구비한다', '함유한다', '가진다' 또는 '특징으로 한다' 등의 표현과 등가의 의미를 가지는 개방형 기재이며, 추가로 열거되어 있지 않은 요소, 재료 또는 공정을 배제하지 않는다.
- [0037] 본 발명에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터는 설포네이트기를 포함하는 중합성 단량체; 히드록실기를 포함하는 아크릴 단량체; 수용성 아크릴계 단량체; 및 다관능성 단량체를 포함하는 중합성 조성물로부터 제조되는 것으로, 10V 이하의 낮은 전압의 인가에 의해 형성된 전기장에서 접힘변형이 가능하다.
- [0038] 종래, 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터는 전기장 감응효과를 보기 위해선, 30V 이상의 높은 전압이 요구됨에 따라, 실질적으로 적용분야가 매우 협소하였다. 또한, 비교적 전기장 감응성을 높이기 위해 고가의 탄소재료를 사용함에 따라 제조단가가 높았고 산업상 이용가능성이 매우 낮다는 단점이 있었다.
- [0039] 그러나, 본 발명에 따른 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터는 설포네이트기를 포함하는 중합성 단량체 및 히드록실기를 포함하는 아크릴 단량체에 수용성 아크릴계 단량체를 포함하며, 가교제로서 다관능성 단량체를 포함하는 중합성 조성물로부터 제조됨에 따라, 10V 이하의 낮은 전압에 의한 전기장에서 접힘변형이 가능하여, 액추에이터로서의 실질적 사용 가능성을 높일 수 있다. 구체적으로, 본 발명의 전기자극 하이드로겔은 상술한 중합성 조성물로부터 제조되어 3차원 가교구조를 가지며, 높은 함수율 및 생체안정성을 가진다. 이와 동시에 우수한 기계적 강도를 가질 수 있을 뿐만 아니라, 가교제의 함량에 따라 기계적 강도 및 함수율 등 물성을 조절할 수 있음에 따라 우수한 기계적-화학적 물성 및 동역학적 정밀제어가 가능하다.
- [0040] 구체적으로, 상기 설포네이트기를 포함하는 중합성 단량체는 방향족 비닐계 단량체일 수 있으며, 설포네이트기

는 C6-C20, 구체적으로 C6-C12의 방향족 고리에 직접 결합된 것일 수 있으며, 상기 방향족 고리에 하나 또는 두 개의 설포네이트기가 결합된 것일 수 있다. 상기 설포네이트기를 포함하는 중합성 단량체는 염의 형태를 가질 수 있으며, 생리학적으로 허용가능한 염이라면 제한받지 않고 포함될 수 있으며, 바람직하게 알칼리 금속 염일 수 있다. 바람직한 일 예로 상기 설포네이트기를 포함하는 중합성 단량체는 4-비닐벤젠설포네이트 또는 4-비닐벤젠설포네이트의 알칼리 금속염일 수 있다.

[0041] 본 발명의 일 양태에 있어서, 상기 히드록실기를 포함하는 아크릴 단량체는 히드록시알킬(메타)아크릴레이트일 수 있다. 알킬은 탄소수 1 내지 10, 바람직하게 탄소수 1 내지 4를 가진 포화된 직쇄상 또는 분지상의 탄화수소를 의미할 수 있으며, (메타)아크릴레이트는 메타아크릴레이트 또는 아크릴레이트를 의미할 수 있다.

[0042] 본 발명의 일 양태에 있어서, 상기 수용성 아크릴계 단량체는 (메타)아크릴산 또는 아크릴아미드일 수 있다. (메타)아크릴산은 메타아크릴산 또는 아크릴산을 의미할 수 있다.

[0043] 일 구체예로, 상기 하이드로겔 액추에이터는 4-비닐벤젠설포네이트, 히드록시에틸(메타)아크릴레이트 및 아크릴산을 포함하는 중합성 조성물로부터 제조된 폴리(나트륨4-비닐벤젠설포네이트/히드록시에틸메타아크릴레이트/아크릴산) 공중합체(이하, P(VBS/HEMA/AAC)) 일 수 있다.

[0044] 또 다른, 일 구체예로, 상기 하이드로겔 액추에이터는 4-비닐벤젠설포네이트, 히드록시에틸(메타)아크릴레이트 및 아크릴 아미드를 포함하는 중합성 조성물로 제조된 폴리(나트륨4-비닐벤젠설포네이트/히드록시에틸메타아크릴레이트/아크릴아미드) 공중합체(이하, P(VBS/HEMA/AAm)) 일 수 있다.

[0045] 본 발명의 일 양태에 있어서, 상기 중합성 단량체 : 상기 아크릴 단량체 : 상기 수용성 아크릴계 단량체의 몰비는 1 : 1~15 : 1~15, 구체적으로, 1 : 2~15 : 2~10, 더욱 구체적으로, 1 : 3~7 : 3~7일 수 있다. 상기 범위를 만족하는 중합성 조성물로부터 제조된 전기장 감응성 하이드로겔은 저전압 하에서 후술할 굽힘각도가 110° 이상으로 전기장에 대한 우수한 감도를 가질 수 있다. 특히, 수용성 아크릴계 단량체가 (메타)아크릴산일 경우, 상기 범위에서 굽힘각도가 140° 이상으로 매우 우수한 전기장 감도를 가질 수 있다.

[0046] 상기 다관능성 단량체는 가교제로서 포함되는 것으로, 라디칼 중합성 관능기가 2 내지 6개, 구체적으로 2 내지 3개 포함되는 단량체일 수 있다. 구체적으로 N,N-메틸렌비스아크릴아미드, 디에틸렌 글리콜 디아크릴레이트, 디에틸렌 글리콜 디메타크릴레이트, 에틸렌 글리콜 디아크릴레이트, 에틸렌 글리콜 디메타크릴레이트, 테트라(에틸렌 글리콜) 디아크릴레이트, 1,6-헥산디올 디아크릴레이트, 디비닐벤젠, 트리메틸올프로판 트리아크릴레이트, 폴리(에틸렌글리콜) 디아크릴레이트로 이루어진 군에서 선택된 어느 하나 또는 둘 이상의 혼합물인 것일 수 있으나 이제 제한받지 않는다. 비한정적인 일 구체예로 폴리(에틸렌글리콜) 디아크릴레이트(PEGDA)일 수 있다.

[0047] 본 발명의 일 양태에 있어서, 상기 중합성 조성물에 포함되는 다관능성 단량체의 함유량은 필요한 하이드로겔의 기계적 강도 및 함수율에 따라 자유롭게 조절될 수 있다. 구체적으로 다관능성 단량체의 양이 많을수록 제조된 하이드로겔의 기계적 강도는 증가하고, 비교적 함수율은 감소한다. 이와 달리, 반대로 다관능성 단량체의 양이 적을수록 제조된 하이드로겔의 기계적 강도는 감소하나, 비교적 함수율은 증가한다.

[0048] 본 발명의 일 양태에 있어서, 상기 중합성 단량체, 아크릴 단량체 및 수용성 아크릴계 단량체를 포함하는 조성물 100몰에 대하여 상기 다관능성 단량체는 가교제로서, 0.01몰 내지 1몰, 구체적으로 0.12 내지 0.5몰이 포함될 수 있다. 상기 범위에서 하이드로겔 액추에이터가 생체적합성을 나타낼 수 있는 적절한 함수율 및 우수한 기계적 강도를 가질 수 있다.

[0049] 상기와 같은 단량체를 포함하는 중합성 조성물로부터 제조된 하이드로겔은 생체안정성을 가질 뿐만 아니라, 전기장에 의한 빠른 반응 시간을 가질 수 있다. 또한, 10V 이하, 구체적으로 0.2 내지 5V의 저전압에 의한 전기장에서도 작동(접힘변형)이 가능한 것으로, 반응 감응성이 매우 우수하다.

[0050] 구체적으로, 0.01M 농도의 염화나트륨 용액 내 이격간격이 40mm인 두 전극 사이에 함침된 두께 1 내지 2mm 및 길이 15mm의 하이드로겔 액추에이터는, 10V 전압 인가 시, 90초 이내에서 하기 식 1에 따른 굽힘변형 평균속도가 0.7° /s 이상일 수 있다. 이때, 하이드로겔 액추에이터의 폭(두께)은 2mm일 수 있으나, 이에 한정되지 않는다.

[0051] [식 1]

[0052] 굽힘변형 평균속도(° /s) = $\Delta R / \Delta t$

[0053] (상기 식 1에서, 상기 Δt 는 상기 전극에 전압을 인가한 시간, 상기 ΔR 은 초기 하이드로겔을 기준으로, 측정

시점에서 측정된 하이드로겔의 굽힘(bending) 각도)

- [0054] 구체적으로, 굽힘변형 평균속도는 0.7 내지 $2^\circ /s$, 더욱 구체적으로, 0.9 내지 $1.5^\circ /s$ 일 수 있다. 이처럼, 본 발명의 하이드로겔 액추에이터는 $10V$ 의 낮은 전압 인가에 따른 전기장 내에서도 빠른 감응속도를 나타내며, 굽힘변형이 가능하다.
- [0055] 상기 굽힘각도 측정 시, 하이드로겔 액추에이터는 염화나트륨 용액 내에서 전기장에 의해 음극 방향으로 구부러진다. 이와 같은 굽힘(bending) 현상은, 하이드로겔 액추에이터가 고분자 네트워크 상의 음이온 성을 나타냄에 따라 발생하는 것으로, 음극과 가까운 하이드로겔 액추에이터의 일면이 수축하고, 양극과 가까운 하이드로겔 액추에이터의 일면이 팽창함에 따라 발생한다.
- [0056] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 굽힘각도 측정 시, 하이드로겔 액추에이터의 최대 굽힘각도는 100° 이상, 구체적으로 120° 이상으로, 매우 높은 감도를 가진다.
- [0057] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 수용성 아크릴계 단량체가 (메타)아크릴산인, P(VBS/HEMA/AAC) 하이드로겔 액추에이터는 상기 굽힘각도 측정시, 전압에 따른 굽힘각도의 변형도가 1.2 내지 $1.6^\circ /V$, 구체적으로 1.3 내지 $1.5^\circ /V$ 일 수 있다.
- [0058] [식 2]
- [0059] 전압에 대한 굽힘각도의 변형도 ($^\circ /v$) = $\Delta R / \Delta V$
- [0060] (상기 식 2에서, 상기 ΔV 는 상기 전극에 인가되는 전압, 상기 ΔR 은 초기 하이드로겔을 기준으로, 특정 전압에서 측정된 하이드로겔의 굽힘(bending) 각도)
- [0061] 즉, 이와 같은, 하이드로겔 액추에이터는 인가되는 전압에 따라 굽힘각도가 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로, 인가 전압을 조절하여 하이드로겔 액추에이터의 정밀제어가 가능할 수 있다.
- [0062] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 굽힘각도 측정 시, 하이드로겔 액추에이터는 $0.01M$ 내지 $0.03M$ 농도의 염화나트륨 수용액에서 최대 굽힘각도를 가질 수 있다.
- [0063] 비 한정적인 일 구체예로, 4-비닐벤젠설포네이트, 히드록시에틸(메타)아크릴레이트 및 아크릴산을 포함하는 중합성 조성물로 제조된 P(VBS/HEMA/AAC) 하이드로겔 액추에이터는, $0.01M$ 내지 $0.02M$ 농도의 염화나트륨 용액에서 최대 굽힘각도를 가질 수 있다. 이때, 최대 굽힘각도는 160° 내지 180° 일 수 있다.
- [0064] 또 다른, 일 구체예로, 4-비닐벤젠설포네이트, 히드록시에틸(메타)아크릴레이트 및 아크릴 아미드를 포함하는 중합성 조성물로 제조된 P(VBS/HEMA/AAM) 하이드로겔 액추에이터는 $0.02M$ 내지 $0.03M$ 에서 최대 굽힘각도를 가질 수 있으며, 이때, 최대 굽힘각도는 130° 내지 150° 일 수 있다.
- [0065] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 본 발명의 하이드로겔 액추에이터는 $25^\circ C$ 에서 하기 식 3에 따른 함수율이 90% 이상, 구체적으로 90 내지 99.9% 인 것일 수 있다. 본 발명의 하이드로겔 액추에이터는 90% 이상의 함수율을 가짐으로써 생체의 다양한 조직 내에서 적합성이 우수할 수 있으며, 매우 낮은 세포 독성을 가질 수 있어, 전술한 바와 같은 전기장에 대한 높은 감응성을 가지는 우수한 생체적합성 재료로서 활용가능하다.
- [0066] [식 3]
- [0067] 함수율 = $[(W_s - W_d)/W_s] \times 100$
- [0068] (상기 식 3에서, W_s 는 물에 침지하여 팽윤된 하이드로겔 액추에이터의 무게이고, W_d 는 건조된 하이드로겔 액추에이터의 무게이다.)
- [0069] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 하이드로겔 액추에이터는 상기 식 3에 따른 함수율 측정 시, 40 내지 50 시간에서 함수율이 더 이상 변화되지 않는 최대 함수율을 나타내는 것일 수 있다.
- [0070] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 하이드로겔 액추에이터는 $0.01M$ 내지 $0.20M$ 의 염화나트륨 용액 내에서 하기 식 4에 따른 함수율이 75 내지 95% , 구체적으로 80 내지 90% 인 것일 수 있다. 상기 범위에서, 생체적합성을 가짐과 동시에 상기 굽힘각도 측정 시, 최대 굽힘각도가 110° 내지 170° 으로, 우수한 변형율을 가질 수 있다.
- [0071] [식 4]
- [0072] 함수율 = $[(W_s - W_d)/W_s] \times 100$

- [0073] (상기 식 4에서, W_s 는 0.01M 내지 0.20M의 염화나트륨 용액에 침지하여 팽윤된 하이드로겔 액추에이터의 무게이고, W_d 는 건조된 하이드로겔 액추에이터의 무게이다.)
- [0074] 본 발명의 일 양태에 있어서, 상기 하이드로겔 액추에이터는 하기 식 5에 따른 겔분율이 65% 이상, 구체적으로 65 내지 99.9%인 것일 수 있다. 상기 범위에서 생체안정성 및 기계적 강도가 우수한 하이드로겔 액추에이터를 제공할 수 있다.
- [0075] [식 5]
- [0076] $\text{겔분율} = (W_{d2}/W_{d1}) \times 100$
- [0077] (상기 식 5에서 W_{d1} 는 50℃에서 24시간동안 건조된 최초의 하이드로겔 액추에이터의 무게이고, W_{d2} 는 25℃의 탈이온수 내에서 48시간동안 유지한 후 50℃에서 24시간동안 건조시킨 하이드로겔 액추에이터의 무게이다.)
- [0078] 상기 범위의 함수율 및 겔분율을 가지는 하이드로겔 액추에이터는 함수율 측정 시, 함수율이 더 이상 변화되지 않는 최대 함수율 시에도 형상이 유지될 수 있다. 즉, 팽윤 시에도 가고 고분자의 구조가 유지됨에 따라 그 액추에이터의 형상이 유지되어 전기자극에 의한 수축 및 회복 과정에도 물성이 저하되지 않고 굽힘각도를 더욱 잘 유지할 수 있다. 이에 따라 본 발명의 액추에이터는 높은 함수율 및 우수한 기계적 강도를 가짐과 동시에 생체안정성을 나타냄에 따라 의료기기, 바이오 모방 로봇, 바이오센서, 웨어러블 스마트 기기 관련 분야에 우수한 산업상 이용가능성을 가질 수 있다. 또한, 기존의 강체를 이용한 액추에이터와 달리 모터와 같은 구동을 위한 부품이나 배터리가 불필요하고, 생체 외부에서 자극을 가함에 따라 고분자 사슬의 화학적 구조 변화를 통해 기계적 움직임이 구현될 수 있어 구조를 단순화할 수 있다.
- [0079] 다음은 본 발명의 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터의 제조방법에 대하여 구체적으로 설명한다.
- [0080] 본 발명의 전기장 감응성 하이드로겔 액추에이터의 제조방법은 (S1)설포네이트기를 포함하는 중합성 단량체, 히드록실기를 포함하는 아크릴 단량체, 수용성 아크릴계 단량체 및 다관능성 단량체를 포함하는 중합성 조성물을 준비하는 단계; 및 (S2)상기 중합성 조성물을 중합시켜 하이드로겔을 제조하는 단계;를 포함하는 것으로, 10V 이하의 낮은 전압에 의한 전기장에서 접합변형이 가능한 하이드로겔 액추에이터를 제조할 수 있다. 구체적으로, 본 발명의 액추에이터의 제조방법은 상기한 하이드로겔 액추에이터를 제조할 수 있으며, 비한정적인 일 구체예로 P(VBS/HEMA/AAC) 하이드로겔 액추에이터 또는 P(VBS/HEMA/AAM) 하이드로겔 액추에이터를 제조할 수 있다.
- [0081] (S1) 단계는 각 단량체를 준비하여 중합성 조성물을 준비하는 단계로, 상기 설포네이트기를 포함하는 중합성 단량체는 방향족 비닐계 단량체이며, 상기 아크릴 단량체는 히드록시알킬(메타)아크릴레이트이고, 상기 수용성 아크릴계 단량체는 (메타)아크릴산 또는 아크릴아미드일 수 있다.
- [0082] 본 발명의 일 양태에 있어서, (S1) 단계에서 상기 중합성 단량체 : 상기 아크릴 단량체 : 상기 수용성 아크릴계 단량체의 몰비는 1 : 1~15 : 1~15, 구체적으로, 1 : 2~12 : 2~10, 더욱 구체적으로, 1 : 3~7 : 3~7일 수 있다.
- [0083] 또한, 상기 중합성 단량체, 아크릴 단량체 및 수용성 아크릴계 단량체를 포함하는 조성물 100 몰에 대하여 상기 다관능성 단량체는 가교체로서, 0.01몰 내지 1몰, 구체적으로 0.15 내지 0.5몰이 포함될 수 있다. 상기 범위에서 우수한 함수율 및 기계적 강도를 가질 수 있다.
- [0084] (S2) 단계는 상기 중합성 조성물을 중합시켜 하이드로겔을 제조하는 단계로, 중합온도가 4℃ 내지 30℃로, 상온에서 중합가능한 중합방법이라면 한정되지 않으나, 일 예로, Redox 중합 또는 광경화를 통해 중합시킬 수 있다. 구체적으로, 자외선 조사를 통해 중합성 조성물을 광경화시킬 수 있으며, 자외선 조사는 상기 중합성 조성물을 경화시킬 수 있는 조건이라면 한정되지 않으나, 바람직하게는 30mW/cm² 내지 100mW/cm², 구체적으로, 350nm 내지 370nm 파장대의 자외선이 50mW/cm² 내지 80mW/cm²의 광량으로 조사될 수 있다. 광 조사 시간 역시, 제조하는 중합성 조성물의 크기에 따라 다양하게 조절될 수 있으나, 구체적으로 10 내지 30분일 수 있으나 이에 한정되지 않음은 물론이다.
- [0085] 본 발명의 일 양태에 있어서, 상기 (S2) 단계 이후, 상기 하이드로겔 액추에이터에 포함된 미반응 단량체를 제거하는 단계를 더 수행할 수 있으며, 일 예로, (VBS/HEMA/AAM) 및 P(VBS/HEMA/AAC) 하이드로겔 액추에이터는 탈이온수로 3번의 워싱과정을 통해 미반응 단량체를 제거할 수 있다. 이와 같은 미반응 단량체 제거 단계를 더 거쳐 제조된 하이드로겔은 물성 설계치와 매우 근접한 하이드로겔의 제조가 가능하여 더욱 동역학적 정밀제어가 가능한 소프트 액추에이터로 제조될 수 있다.
- [0086] 이하, 본원에 대하여 실시예를 이용하여 좀 더 구체적으로 설명하지만, 하기 실시예는 본원의 이해를 돕기 위하

여 예시하는 것일 뿐, 본원의 내용이 하기 실시예에 한정되는 것은 아니다.

(실시예 1)

도 1에 도시된 바와 같이, 조성물을 중합시켜 하이드로겔 액추에이터를 제조하였다. 먼저, 소듐4-비닐벤젠설페이트(Sodium 4-vinylbenzenesulfonate, VBS, Sigma-Aldrich), 2-하이드록시에틸메타크릴레이트(2-hydroxyethylmetacrylate, HEMA, Chuo-ku, Tokyo) 및 아크릴아미드(Acrylamide, AAm, Chuo-ku, Tokyo)에 가교제로 폴리(에틸렌글리콜)디아크릴레이트(poly (ethylene glycol) diacrylate, PEGDA, Mn=575, Sigma-Aldrich)를 투입한 후, 볼텍스 믹서 및 초음파 처리를 사용하여 탈이온수에 용해시켰다. 용존산소를 제거하기 위해 20분 동안 질소 가스 퍼징하고, 개시제로 0.01g의 과황산암모늄(ammonium peroxydisulfate, APS, Sigma-Aldrich), 촉매로 135 μ l의 테트라메틸에틸렌다이아민 (N, N, N', N'-tetramethylethylenediamine, TMEDA, Sigma-Aldrich)을 투입하였다. 제조되는 하이드로겔의 가시성을 높이기 위해 60mg의 메틸렌블루를 조성물에 첨가하였다.

제조된 조성물을 유리몰드(100x100x1mm)에 부은 후 20분 동안 질소 가스 퍼징을 진행하였다. 이후, 50mW/cm² 강도의 365nm 파장의 자외선을 조사하여 중합하였다.

VBS : HEMA : AAm 및 PEGDA의 조성비는 하기 표 1에 표기하였다.

이하, 실시예 2 내지 5를 하기 표 1을 참조하여 제조하였다. 실시예 2 내지 5는 실시예 1과 동일한 방법으로 진행하였으나, 하기 표 1에 기재된 조건으로 각각 진행하였다.

(실시예 6)

실시예 1에 있어서, 상기 AAm 대신 아크릴산(Acrylic acid, AAc)를 사용하였으며, 50mW/cm² 대신 80mW/cm² 강도의 365nm 파장의 자외선을 조사한 것을 제외하고 실시예 1과 동일하게 수행하여, 전기자극 하이드로겔 P(VBS/HEMA/AAc)를 제조하였다.

VBS : HEMA : AAc 및 PEGDA의 조성비는 하기 표 1에 표기하였다.

이하, 실시예 7 내지 10을 하기 표 1을 참조하여 제조하였다. 실시예 7 내지 10 실시예 6과 동일한 방법으로 진행하였으나, 하기 표 1에 기재된 조건으로 각각 진행하였다.

표 1

Hydrogel	Monomers ^a (mmol)				Crosslinker (mmol)
	VBS	HEMA	AAm	AAc	PEGDA
실시예 1 P(VBS/HEMA/AAm)-1/10/5-1.0	3.75	37.50	18.75	-	0.094
실시예 2 P(VBS/HEMA/AAm)-1/10/5-1.5	3.75	37.50	18.75	-	0.141
실시예 3 P(VBS/HEMA/AAm)-1/10/5-3.0	3.75	37.50	18.75	-	0.282
실시예 4 P(VBS/HEMA/AAm)-1/5/5-3.0	5.46	27.27	27.27	-	0.282
실시예 5 P(VBS/HEMA/AAm)-2/5/5-3.0	10.00	25.00	25.00	-	0.282
실시예 6 P(VBS/HEMA/AAc)-1/10/5-1.0	3.75	37.50	-	18.75	0.094
실시예 7 P(VBS/HEMA/AAc)-1/10/5-1.5	3.75	37.50	-	18.75	0.141
실시예 8 P(VBS/HEMA/AAc)-1/10/5-3.0	3.75	37.50	-	18.75	0.282
실시예 9 P(VBS/HEMA/AAc)-1/5/5-3.0	5.46	27.27	-	27.27	0.282
실시예 10 P(VBS/HEMA/AAc)-2/5/5-3.0	10.00	25.00	-	25.00	0.282

^a Total amount of monomers in feed was 60.00 mmol

^b PEGDA (poly (ethylene glycol) diacrylate, Mn=575)

도 2는 실시예 1, 4, 6 및 9의 하이드로겔 액추에이터의 적외선분광법(FT-IR) 측정 결과가 도시되어 있다. 구체적으로 도 2(A)는 사용한 VBS, HEMA, AAm 및 AAc 단량체의 FT-IR 결과가 도시되어 있으며, 도 2(B)에는 실시예

1, 4, 6 및 9에서 제조한 하이드로겔 액추에이터의 FT-IR 결과가 도시되어 있다. 도 2를 참조하면, 중합이 잘 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

[0098] 1. 겔분율 측정

[0099] 도 3에는 실시예들에 따른 겔분율 측정결과가 도시되어 있다.

[0100] 겔분율은 용해성 부분의 추출 후 불용해성 부분의 중량을 측정하여 결정된다. 구체적으로, 하기와 같이 측정된다.

[0101] 제조된 하이드로겔 액추에이터를 일정 크기(5x5mm²)로 자른 후, 50℃의 오븐에서 완전히 건조시킨 뒤 무게를 측정하였다. 그 다음 측정된 샘플을 탈이온수가 담긴 100 ml 병에 넣고, 진탕 항온 수조에서 37 ℃, 60 rpm으로 48시간 작동시켰다. 이 후 병에서 하이드로겔 액추에이터 샘플을 꺼내어 다시 50 ℃ 오븐에 넣고 24시간 동안 완전히 건조시켰다.

$$[0102] \text{겔분율} = (W_{d2}/W_{d1}) \times 100$$

[0103] (상기 식에서 W_{d1} 는 50℃에서 24시간동안 건조된 최초의 하이드로겔 액추에이터의 무게이고, W_{d2} 는 25℃의 탈이온수 내에서 48시간동안 유지한 후 50℃에서 24시간동안 건조시킨 하이드로겔 액추에이터의 무게이다.)

[0104] 도 3을 참조하면, 실시예의 하이드로겔은 65%이상의 높은 겔분율을 가짐을 확인할 수 있었다. 구체적으로 실시예들은 66.3 내지 97.9%의 겔분율을 가지며, 대부분은 85%이상의 매우 높은 겔분율을 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한, 가교제로 사용되는 PEGDA함량이 높을수록 겔분율이 순차적으로 높음을 확인할 수 있었다.

[0105] 2. 함수율 측정

[0106] 도 4 내지 도 5는 본 발명의 실시예들에 따른 함수율 측정결과가 도시되어 있다.

[0107] 구체적으로 도 4(A)는 제조된 하이드로겔 액추에이터 (a), 건조된 하이드로겔 액추에이터 (b) 및 물에 팽윤된 하이드로겔 액추에이터 (c)의 사진이며, 도 4(B) 및 4(C)는 실시예에 따른 함수율 비교 그래프이다.

[0108] 도 4의 함수율은 건조된 하이드로겔 액추에이터를 탈이온수에 담근 후, 팽윤된 하이드로겔 액추에이터의 무게를 측정하여 측정하였다.

[0109] 구체적으로, 도 4의 함수율은 하기와 같이 측정되었다.

[0110] 실시예에서 제조된 하이드로겔 액추에이터를 일정한 크기로 준비하고 무게 감소가 없을 때까지 50℃ 온도에서 24시간동안 충분히 건조시킨 다음, 무게를 측정한다. 측정된 건조 하이드로겔 액추에이터를 실온(25℃)에서 각각 3차 증류수 중에 중량의 변화가 없을 때까지 (48시간) 침지시켜 다음 식과 같이 하이드로겔 액추에이터의 평형 함수율 (EWC; equilibrium water content)을 측정한다.

$$[0111] \text{함수율} = [(W_s - W_d)/W_s] \times 100$$

[0112] (상기 식에서, W_s 는 물에 침지하여 팽윤된 하이드로겔 액추에이터의 무게이고, W_d 는 건조된 하이드로겔 액추에이터의 무게이다.)

[0113] 도 4를 참조하면 건조 및 팽윤에 따라 크기는 변형되지만, 형상(사각형)은 유지함을 확인할 수 있었으며, 실시예들의 하이드로겔 액추에이터는 90%이상의 상대적으로 매우 높은 함수율을 가짐을 확인할 수 있었다. 아울러, 비교적 PEGDA의 양이 증가할수록 함수율이 선형적으로 감소하였으며, VBS가 많을수록 비교적 함수율이 높음을 확인할 수 있었다.

[0114] 구체적으로, 도 5는 0.01M 내지 0.20M 농도의 염화나트륨 용액 내에 실시예 1 및 실시예 6을 침지시킨 후 함수율을 측정한 결과를 나타낸 그래프이다.

[0115] 도 5의 함수율은 건조된 하이드로겔 액추에이터를 특정 농도의 염화나트륨 용액에 담근 후, 팽윤된 하이드로겔 액추에이터의 무게를 측정하여 산출한다.

$$[0116] \text{함수율} = [(W_s - W_d)/W_s] \times 100$$

[0117] (상기 식에서, W_s 는 0.01M 내지 0.20M의 염화나트륨 용액에 침지하여 팽윤된 하이드로겔 액추에이터의 무게이고, W_d 는 건조된 하이드로겔 액추에이터의 무게이다.)

[0118] 도 5를 참조하면, 실시예들은 0.01M 내지 0.20M의 염화나트륨 용액에서 약 77 내지 93%의 함수율을 나타냄을 확인할 수 있었다.

[0119] 3. 기계적 강도 측정

[0120] 도 6은 실시예들의 기계적 강도 측정 결과가 도시되어 있다. 구체적으로 도 6(A) 및 6(B)는 실시예에 따른 최대 압축강도 측정 결과가 도시되어 있으며, 도 6(C)는 압축강도 측정 방법 순서 사진이 나타나 있으며, 도 6(D)는 최대압축강도 도달 후 하중 변화를 측정한 결과를 도시한 것이다.

[0121] 압축강도는 제조된 하이드로겔 액추에이터를 사용하여 10mm×10mm 크기의 하이드로겔에 138mm/min의 속도로 하중을 일정하게 가함으로써 압축강도를 측정하였다.

[0122] 도 6을 참조하면, 본 발명의 실시예들은 70 내지 113.6kpa 범위의 우수한 압축강도를 가지며, PEGDA가 증가할수록 선형적으로 압축강도가 증가함을 확인하였다. 아울러 도 6(C)를 통해 하이드로겔은 하중 제거 후 원래 부피를 거의 회복함을 확인할 수 있었다. 또한, 도 6(D)를 참조하면, 실시예들은 최대 압축 하중에 도달한 후, 깨지지 않고 원래 형상을 유지하였다. 이를 통해 본 발명의 실시예들은 우수한 기계적 강도를 가짐을 확인할 수 있었으며, 가교제 함량을 통해 원하는 물성에 따라, 기계적 강도를 조절할 수 있음을 확인하였다.

[0123] 4. 전기장 감응성 측정

[0124] 도 7 내지 도 9는 실시예들의 전기장 감응성 측정 결과가 도시되어 있다.

[0125] 구체적으로 도 7(A)는 굽힘각도 측정방법의 모식도가 도시되어 있으며, 도 7(B)는 실시예 1을 상기 도 7(A)에 도시된 방법으로 굽힘각도 측정 시, 전압 인가 후 시간에 따른 굽힘각도 변화를 나타내는 사진이며, 도 7(C)는 실시예 1 내지 3 및 실시예 6 내지 8의 최대굽힘각도 측정 결과 비교 그래프 및 도 7(D)는 실시예 3 내지 5 및 실시예 8 내지 10의 최대굽힘각도 측정 결과를 나타낸 그래프이다.

[0126] 구체적으로 전기장에 의한 굽힘각도는 하기와 같이 측정되었다.

[0127] 도 7(A)에 도시된 바와 같이 실시예에서 제조된 하이드로겔을 두께 1 내지 2mm, 폭 2mm, 길이 15mm로 준비한다. 이후, 염화나트륨 용액 내 이격간격이 40mm인 두개의 전극 사이에 위치시킨 후 전극에 인가되는 전압 및 염화나트륨 용액 농도를 변화시키며, 더 이상 굽힘각도가 변화하지 않는 최대 굽힘각도에 이를 때까지 전압을 인가하였다.

[0128] 도 7을 참조하면, 제조된 실시예들의 하이드로겔 액추에이터는 음극 측으로 구부러지며 100° 이상의 굽힘각도를 나타냄을 확인할 수 있었다. 특히, 실시예 4의 경우 147° 이상의 매우 높은 굽힘각도를 가짐을 확인할 수 있었다.

[0129] 구체적으로, 실시예 1의 굽힘각도 측정 시, 시간에 따른 하이드로겔 액추에이터의 굽힘거동을 촬영(180초 동안, 20초 간격)한 도 7(B)를 참조하면, 단 시간 내에 전기장에 의한 감응성으로 인해 굽힘변형이 일어나며, 비교적 빠른 속도로 굽힘변형이 일어남을 육안으로 확인할 수 있었다. 7(C)를 참조하면, 아크릴아미드 단량체를 포함하는 조성물로부터 제조된 하이드로겔 액추에이터보다 아크릴산 단량체를 포함하는 조성물로부터 제조된 하이드로겔 액추에이터가 보다 큰 최대굽힘각도를 나타내며, 큰 굽힘변형을 가짐을 확인하였다. 또한, 가교제가 더 포함될수록 최대굽힘각도는 감소함을 확인하였다. 6(D)를 참조하면, HEMA에 비해 VBS가 함유될수록 두께가 두껍게 형성되었으나, VBS : HEMA의 몰비가 1 : 5인 실시예 4 및 실시예 9의 하이드로겔 액추에이터의 최대굽힘각도가 가장 큼을 알 수 있었다.

[0130] 도 8(A) 및 도 8(B)는 전압인가 변화(0 내지 10V)에 따른 실시예 1 및 실시예 6의 굽힘각도 측정 결과를 각각 나타낸 그래프이며, 도 8(C)는 인가되는 전압 변화에 따른 실시예 1 및 6의 최대 굽힘각도를 비교한 그래프이다.

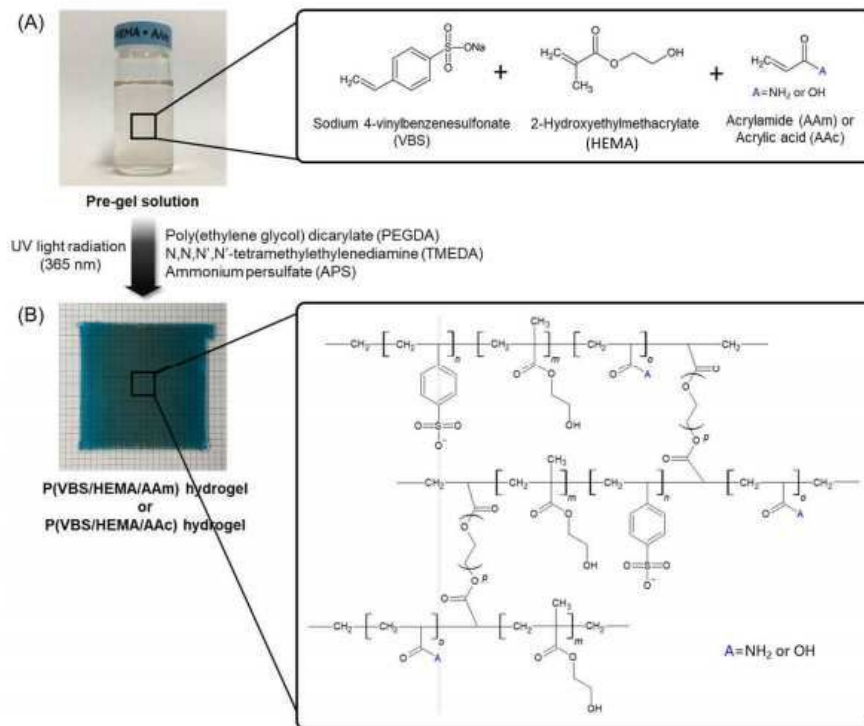
[0131] 도 8를 참조하면, 실시예들은 낮은 전압하에서도 전기자극에 의한 굽힘변형을 나타내었음을 확인할 수 있었다.

[0132] 구체적으로, 도 8(A) 및 도 8(B)를 참조하면, 실시예들은 인가되는 전압이 클수록 굽힘 변형율이 크며, 특히, 10V 전압 인가 시, 실시예 1 은 전압인가 시점부터 90초 구간에서 약 1° /s, 실시예 6은 약 1.2° /s의 속도로 매우 빠른 변형율을 나타냄을 확인할 수 있었다. 도 8(C)를 참조하면, 전압이 증가할수록 굽힘각도가 더 큼을 확인할 수 있었으나, 특히, 아크릴산 단량체를 포함하는 조성물로부터 제조된 실시예 6의 경우, 전압에 비례하여 선형적으로 굽힘각도가 증가함을 확인할 수 있었다.

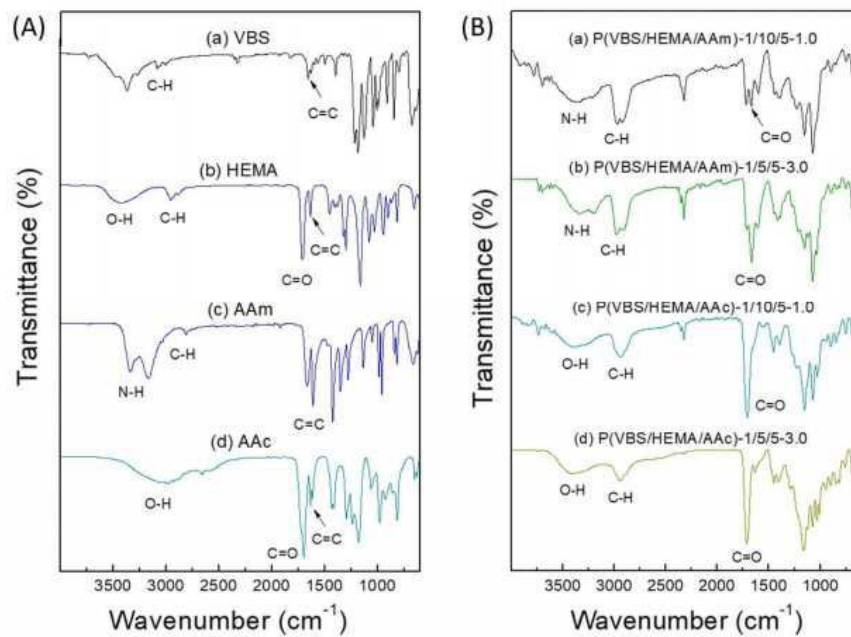
- [0133] 도 9는 염화나트륨 용액의 농도변화에 따른 굽힘각도 변화를 나타내는 그래프이다. 구체적으로, 도9(A) 및 도 9(B)는 염화나트륨 용액의 농도 변화에 따른 실시예 1 및 실시예 6의 굽힘각도 변화를 각각 나타낸 그래프이며, 도 8(C)는 염화나트륨 용액 농도 변화에 따른 실시예 1 및 실시예 6의 최대 굽힘각도 변화를 나타낸 그래프이다.
- [0134] 도 9를 참조하면, 실시예들은 특정 염화나트륨 농도에서 매우 높은 굽힘변형을 나타냄을 알 수 있었다. 구체적으로 도 9(A) 내지 도 9(C)를 참조하면, 실시예 1은 0.025M의 염화나트륨 농도에서 최대 굽힘각도가 약 140° 이었으며, 실시예 6은 0.015M의 염화나트륨 농도에서 최대 굽힘각도 170° 를 가짐을 알 수 있었다.
- [0135] **5. 세포독성 측정**
- [0136] 도 10은 본 발명의 하이드로겔 액추에이터의 세포독성 측정 결과가 도시되어 있다.
- [0137] 상기 실시예들에서 제조된 하이드로겔 액추에이터를 이용하여 세포독성(cytotoxicity) 평가하였으며, cytotoxicity는 의약품 재료의 생체적합성을 나타내는 중요한 요소이다. In vitro 상에서 실시예 1 및 실시예 6의 하이드로겔 액추에이터의 cytotoxicity를 CCK-8시험에 따라 측정하였다.
- [0138] 한국세포주은행으로부터 분양받은 A549 세포를 사용하여 in vitro 상에서의 세포독성을 측정하였다. 정확한 무게를 측정한 하이드로겔 샘플을 배양액에 침지시켜 incubator(37℃, 5% CO₂)에서 보관한다(3.0g/ml). 48시간 후, 하이드로겔 샘플을 분리하고 얻은 용출물을 100% original medium으로 하여 배양액을 사용하여 희석된 다른 농도(25%, 50%, 75%, 100%)의 용출물 샘플들을 제조한다.
- [0139] 하이드로겔을 2일 동안 배양하여 용출시킨 후, 용출물의 농도에 따른 A549 세포의 생존율(viability)결과를 도 11에 나타내었다. 도 11에 나타낸 바와 같이 실시예 1 및 실시예 6의 하이드로겔 모두 80% 이상의 높은 cell viability를 보임을 확인할 수 있었다. 하이드로겔 용출물의 농도를 변화시킨 결과에서 보듯이 cell viability는 용출물의 농도에는 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.
- [0140] 이상과 같이 본 발명에서는 특정된 사항들과 한정된 실시예 및 도면에 의해 설명되었으나 이는 본 발명의 보다 전반적인 이해를 돕기 위해서 제공된 것일 뿐, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다.
- [0141] 따라서, 본 발명의 사상은 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니되며, 후술하는 특허청구범위뿐 아니라 이 특허청구범위와 균등하거나 등가적 변형이 있는 모든 것들은 본 발명 사상의 범주에 속한다고 할 것이다.
- [0142]

도면

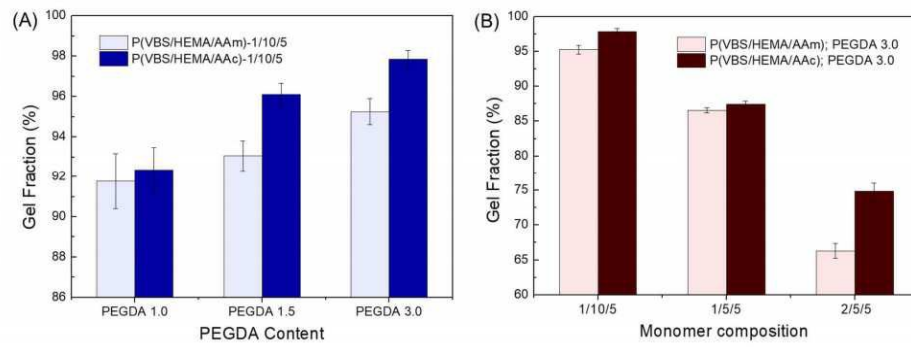
도면1



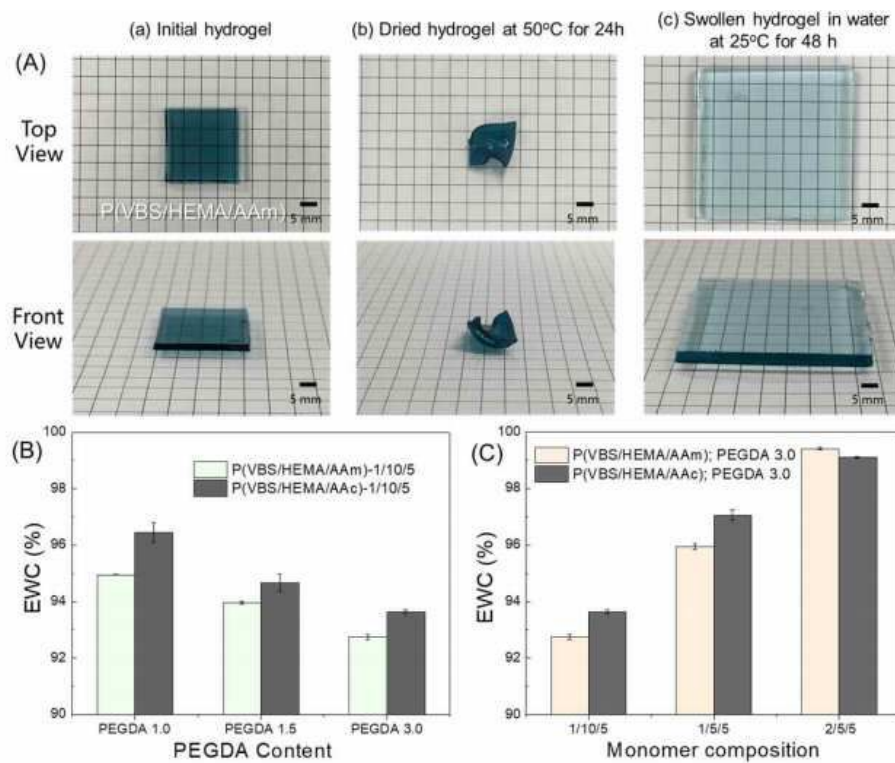
도면2



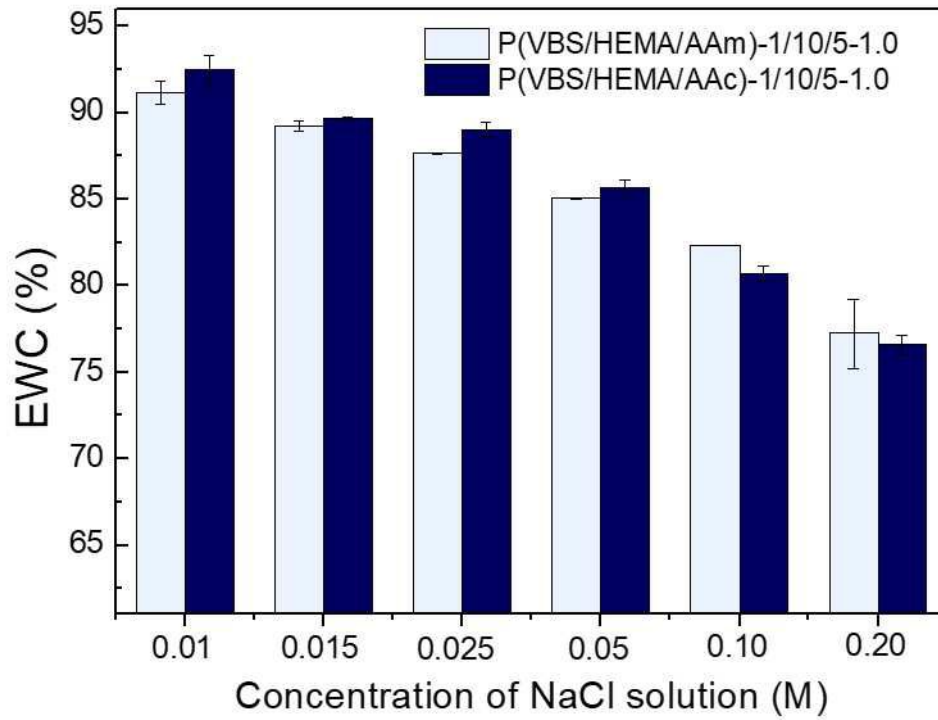
도면3



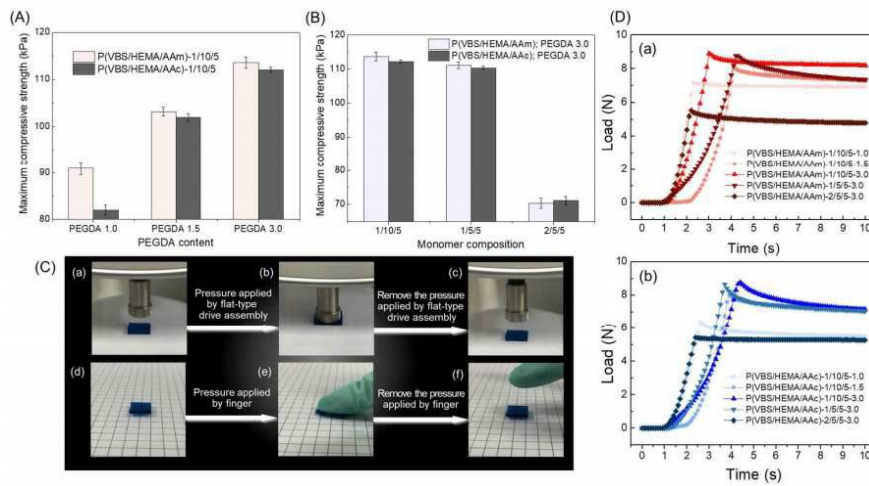
도면4



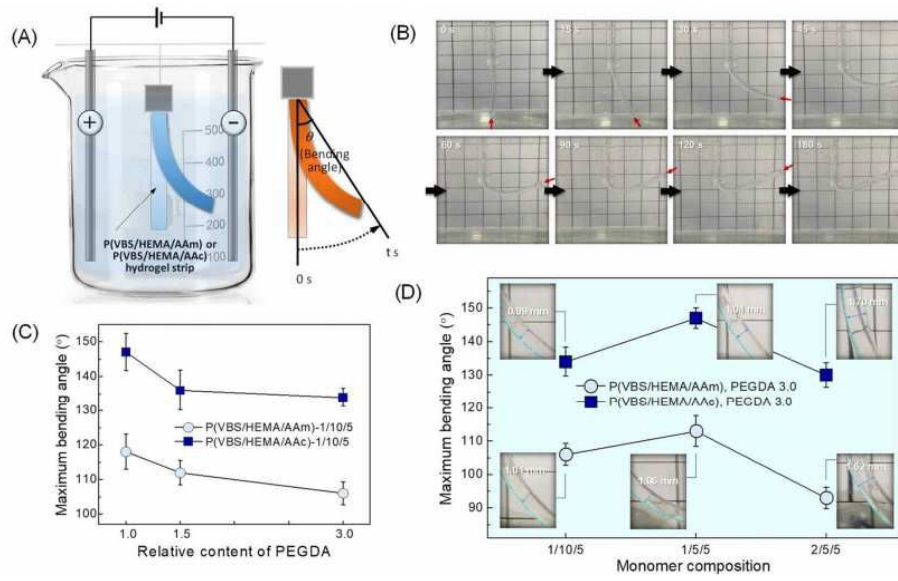
도면5



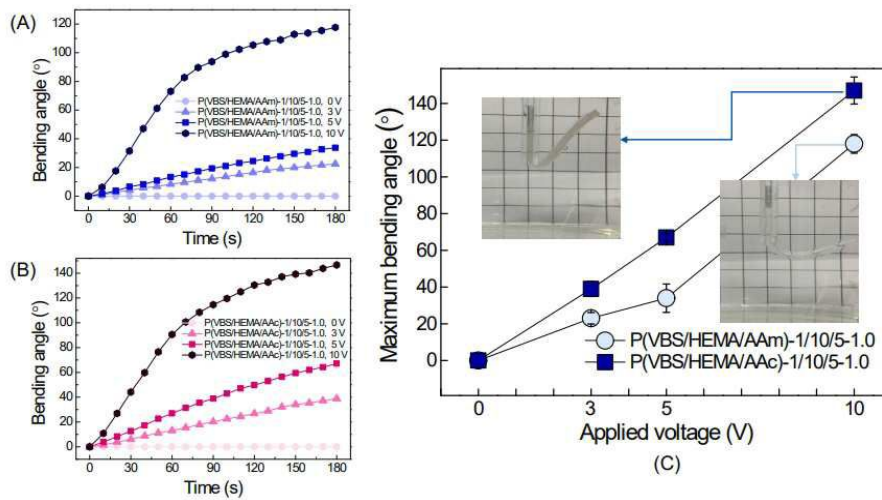
도면6



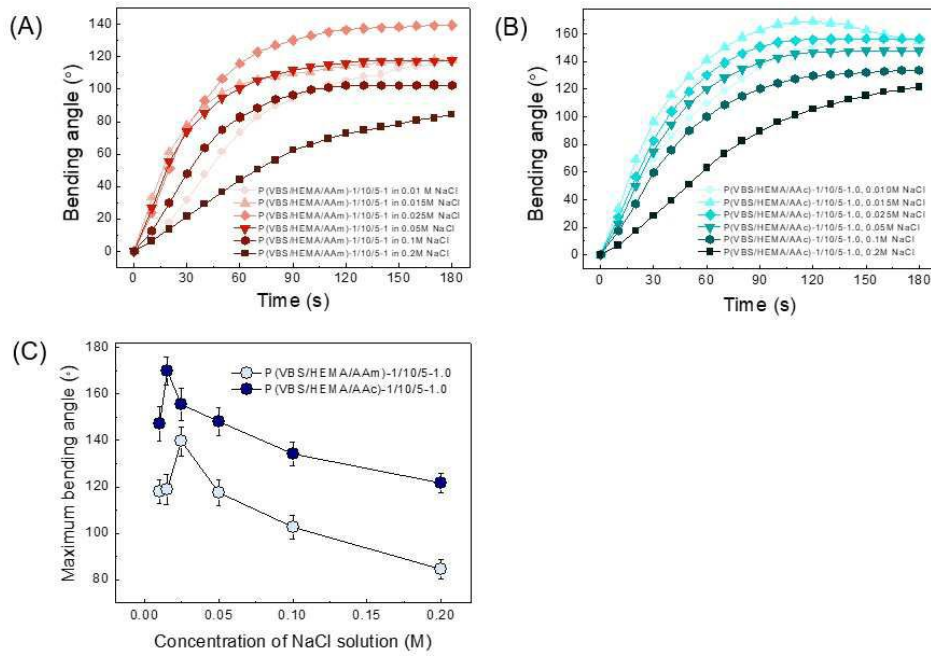
도면7



도면8



도면9



도면10

