

이온성 액체가 함유된 poly(γ -glutamic acid) 수화젤의 제조 및 스트레인 센서로의 응용

박정진¹ · 강영민¹ · 김민희^{*†1} · 박원호^{†1}

충남대학교 유기응용재료공학과

*경북대학교 섬유패션디자인학부(섬유공학전공)

(2024년 9월 3일 접수, 2024년 10월 15일 수정, 2024년 10월 18일 채택)

Preparation of Poly(γ -glutamic acid) Hydrogels with Ionic Liquids and Their Application as a Strain Sensor

Jeong Jin Park¹, Yeong Min Kang¹, Min Hee Kim^{*†1}, and Won Ho Park^{†1}

Department of Organic Materials Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

*Department of Textile Engineering, Kyungpook National University, Sangju 37224, Korea

(Received September 3, 2024; Revised October 15, 2024; Accepted October 18, 2024)

초록: 최근, 건강과 피트니스에 대한 관심이 높아지면서 인체의 다양한 활동을 감지할 수 있는 웨어러블 디바이스에 대한 연구가 확대되고 있다. 스트레인 센서는 웨어러블 디바이스에 장착되는 센서 중 하나로, 동작의 변화나 심박수, 혈압 등에 의해 재료에 가해지는 변형을 감지함으로써 신체의 움직임을 실시간으로 모니터링하는 기능을 제공한다. 본 연구에서는 우수한 생체적합성을 갖는 poly(γ -glutamic acid)와 이온성 액체를 통합한 고분자 수화젤을 제조하였다. 수화젤 형태의 스트레인 센서는 기능의 저하 없이 구부리거나 늘릴 수 있는 유연한 소재로, 다량의 수분을 포함하여 이온의 이동이 용이하며 인체 피부의 부드러움과 유연성을 모방할 수 있어 일상생활에 자연스럽게 활용될 수 있는 잠재력을 확인하였다.

Abstract: In recent years, the increasing interest in health and fitness has led to enhanced research into wearable devices capable of monitoring various human body motions. Strain sensors, which are integrated into wearable devices, provide the capability to monitor bodily movements in real time by detecting the strain applied to the material due to changes in motion, heart rate, and blood pressure. This study investigates a polymer hydrogel composed of biocompatible poly(γ -glutamic acid) and an ionic liquid, developed as a strain sensor. The hydrogel exhibits notable flexibility, maintaining its functionality even when subjected to bending or stretching. Furthermore, it contains a substantial amount of water, facilitates ionic movement, and can emulate the softness and flexibility of human skin, thus demonstrating its potential for seamless integration into daily life.

Keywords: poly(γ -glutamic acid), ionic liquid, hydrogel, strain sensor, real-time motion monitoring.

서 론

건강한 삶을 추구하는 현대사회의 기술발전과 함께, 헬스케어 시장이 확장되면서 웨어러블 디바이스의 수요도 증가하고 있다. 이 중에서 기계적 변형 및 자극을 정량적 전기신호로 변환할 수 있는 스트레인 센서는 상당한 관심을 끌고 있으며 의료, 스포츠, 로봇공학, 국방 및 유지 보수 분야에서 널리 사

용될 수 있다.¹⁻³ 특히, 의료 및 재활 모니터링 분야에서 스트레인 센서를 적용하면 기존의 접근방식과 달리 유연하고 가벼우며 사용자 친화적이면서 실시간으로 생리적 건강을 지속적이고 장기적으로 관찰할 수 있다.⁴ 그러나, 기존의 금속 및 전도성 재료를 기반으로 하는 전자기기는 신축성 및 유연성이 부족하여 신축성을 요구하는 전자기기를 설계하는데 근본적인 제약이 따른다. 또한, 인체의 굴곡진 표면에 밀착할 수 없어 불편하고 인체 생리학적 데이터의 모니터링이 곤란하며, 전자소재의 특성상 불투명하다는 한계점이 존재한다. 웨어러블 디바이스가 투명성을 가지게 되면 재활 및 의료분야에서 장점을 발휘할 수 있다. 일반적으로 웨어러블 디바이스를 통한 생체 신호 데이터의 수집은 오로지 센서의 활성도만을 통해

[†]To whom correspondence should be addressed.
parkwh@cnu.ac.kr, ORCID[®] 0000-0003-1768-830X
mhkim88@knu.ac.kr, ORCID[®] 0000-0002-1428-3991
©2024 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

이루어지는데, 이때 손상된 조직의 시각적 정보는 포함되지 않아 치유과정이 직관적이지 못하다. 이처럼 낮은 유연성, 신축성 그리고 투명성을 극복하기 위해 최근에는 수화젤 형태의 스트레인 센서의 개발이 이루어지고 있다.⁵

수화젤은 다량의 수분을 함유하고 있는 3차원 고분자 망상 구조로 인체조직과 유사한 기계적 특성을 가진다. 전도성 수화젤은 전자전도성 수화젤과 이온전도성 수화젤로 나뉜다. 전자전도성 수화젤은 주로 graphene, carbon nanotube 등과 같은 탄소 기반 첨가제가 도입되어 우수한 전기전도성을 나타낸다.⁶ 그러나 탄소 기반 첨가제는 분산성이 좋지 않아 소수성 응집이 발생하며, 응집이 발생한 부분에서부터 파손이 쉽게 일어날 수 있다.⁷ 또한, π -공액구조를 갖는 탄소소재의 특성상 수화젤의 투명성을 저하시킨다. 이온전도성 수화젤은 인체 내부와 유사한 전도성 메커니즘을 나타내므로 인간의 동작 모니터링에서 많은 주목을 받고 있다.¹ 수화젤 내부의 전해질 이온은 고분자 네트워크에서 자유롭게 이동할 수 있으며, 이러한 이온전도성 수화젤은 매우 투명하다는 장점이 있다. 수화젤의 높은 수분함량은 이상적인 전도성 환경을 제공하고 이온전도성 수화젤의 전도도를 향상시킬 수 있다.⁸ 그러나, 수화젤은 개방된 환경에서 쉽게 수분이 증발하고, 이는 낮은 전기전도도와 민감도를 야기하는 치명적인 단점을 가진다. 따라서, 수분 손실을 억제하고 이온전도성을 저하시키지 않는 수화젤의 개발이 필요하다.

일반적으로 이온전도성 수화젤의 경우, 무기염을 첨가하여 이온전도도와 동결 방지 특성 등을 향상시킬 수 있다. 그러나 무기염의 농도가 증가할수록 수화젤의 기계적 물성은 낮아질 수 있다. 이온성 액체(ionic liquid, IL)는 유기 이온과 무기 이온의 음이온 및 양이온 쌍으로 구성된 용융염이며, 일반적으로 유기합성, 촉매 및 전기화학 연구를 위한 친환경 용

매로 알려져 있다.⁹ 낮은 휘발성, 열안정성, 높은 이온전도도와 같은 장점을 가지기 때문에 이온전도성 수화젤 개발에 적용될 수 있다. Li^+ 등은 poly(acrylic acid)와 1-vinyl-3-butylimidazolium bromide(VBIM:Br)을 혼합하여 유연하고 투명한 이온성 젤을 제조하였으며, 이는 넓은 온도범위($-20 - 25\text{ }^\circ\text{C}$)에서 우수한 정확성을 나타내었다.¹⁰ 또한 poly(methyl methacrylate-ran-butyl acrylate) (PMMA-r-PBA)와 1-ethyl-3-methylimidazolium-bis(trifluoromethylsulfonyl) imide (EMIM:TFSI)를 혼합하여 고신축성(-850%) 및 고감도(gauge factor = 2.73)를 갖는 아이오노 스킨에 대하여 보고한 바 있다.¹¹ 이처럼 IL은 유연한 웨어러블 센서의 유망한 구성물질로 여겨진다. IL의 함량이 높을수록 이온전도성 수화젤의 전도도를 향상시킬 수 있으나, 과량의 IL은 이온전도성 수화젤의 강도와 이온전도도를 오히려 감소시킬 수 있다.

본 연구에서는, glycidyl methacrylate(GMA)로 개질한 poly(γ -glutamic acid) (γ -PGA)를 사용하여 광가교형 이온전도성 수화젤을 제조하였다. γ -PGA는 우수한 생체적합성, 무독성을 가지는 고분자 전해질로, *l*-glutamic acid와 *d*-glutamic acid의 반복단위로 구성되어 있다. 또한, γ -PGA는 우수한 보수성으로 수화젤이 쉽게 건조되는 것을 막을 수 있다. 수화젤에 이온성 액체인 1-butyl-3-methylimidazolium chloride (BMIM:Cl)을 도입하여 이온전도도를 향상시켰다. IL은 수화젤 내부에서 윤회제 역할을 하여 인체의 굽힘 정도(-140%)를 측정할 수 있는 인장률을 나타내었고, 가시광선 영역에서 우수한 투명성을 나타내었다.¹⁰ 또한, 손가락 굽힘과 같은 작은 움직임부터 팔꿈치 및 아킬레스건의 큰 움직임들의 각도 변화까지 실시간으로 측정할 수 있어 스트레인 센서로서의 적합성을 평가하여 재활 및 헬스케어 제품으로의 응용가능성을 확인하였다(Figure 1).

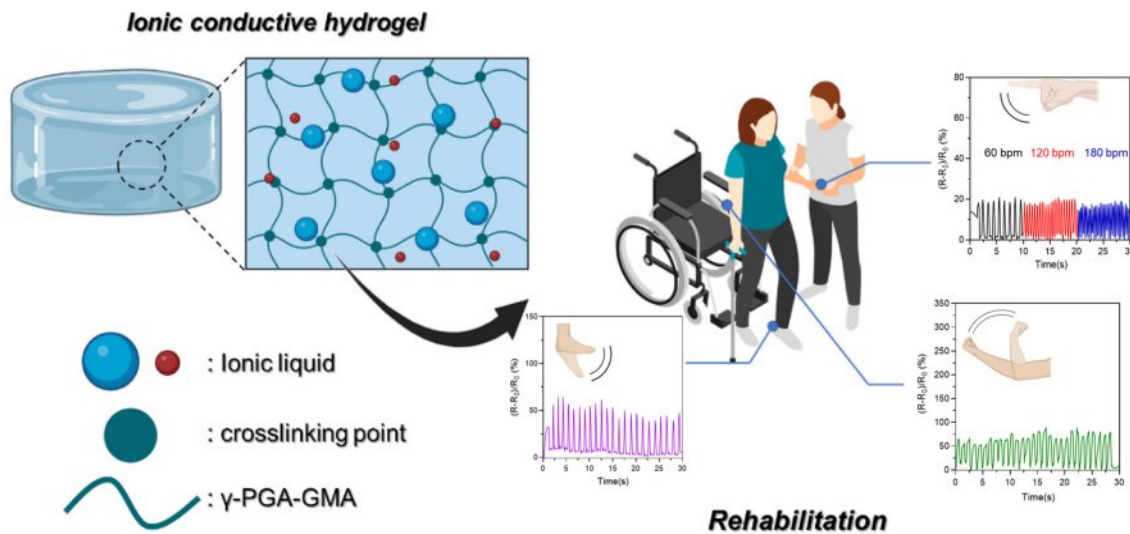


Figure 1. Schematic illustration of ionic conductive hydrogel for patients' rehabilitation.

실 험

재료. γ -PGA(M_w : 2000000, Na salt form)은 Greenway Biotech Co.에서 구입하였다. Dulbecco's Phosphate Buffered Saline(DPBS, without Calcium and Magnesium), lithium phenyl-2,4,6-trimethylbenzoyl-phosphinate(LAP, M_w : 294.15), BMIM:Cl(M_w : 174.67)와 GMA (M_w : 142.15)는 Sigma-Aldrich Co.(St Louis, MO, USA)에서 구입하였다. 모든 화학물질은 추가 정제없이 받은 그대로 사용하였다.

GMA로 개질된 γ -PGA의 제조. γ -PGA는 이전에 알려진 방법으로 개질하였다. 간단히, 5 wt%의 γ -PGA 수용액을 제조하여 pH가 7-8 사이가 되도록 조정하였다. 이후, γ -PGA와 GMA의 몰비가 1:0.25가 되도록 반응시킨 뒤, D.I. water에 2일간 투석하여(cut off = 12000-14000) 미반응물을 제거하였다. 최종 생성물은 7일간 동결건조하여 얻었다. 제조한 생성물은 γ -PGA-GMA라고 명명하였다.

γ -PGA-GMA 이온전도성 수화젤의 제조. γ -PGA-GMA 기반 수화젤 및 이온성 수화젤은 광교를 통해 제조하였다. 먼저, γ -PGA-GMA를 다양한 조성비를 갖는 DPBS와 IL(BMIM:Cl) 혼합용액에 용해시켰다. 이후, 5 mM LAP를 첨가한 뒤, 광조사를 통해 수화젤을 제조하였다(365 nm, 5 mW/cm², 2 min). 수화젤의 내부 DPBS와 IL의 비율에 따라 각각 IG₀, IG₂, IG₄ 또는 IG₆이라고 명명하였으며 자세한 조성은 아래 Table 1에 명시하였다.

이온전도성 수화젤의 특성 분석. γ -PGA-GMA는 attenuated total reflectance infrared spectroscopy(ATR-IR, ALPHA-P, Bruker, USA)와 proton nuclear magnetic resonance(¹H NMR, 400 MHz, ADVANCE III, Bruker, USA)를 사용하여 분석하였다. ¹H NMR 스펙트럼을 통해 구조적 변화를 확인하였고 관련 피크는 치환도(DS, %)를 계산하기 위해 사용하였다. DS는 γ -PGA 주사슬의 α proton peaks(δ = 4.16 ppm)에 대한 GMA의 vinyl group proton peaks(δ = 5.7-6.2 ppm)의 integration ratio로 구하였으며 다음과 같은 식을 통해 계산하였다.

$$DS (\%) = \frac{\text{Intensity of vinyl group protons}/2}{\text{Intensity of } \alpha\text{-proton}} \times 100 \quad (1)$$

제조된 수화젤 및 이온전도성 수화젤의 화학구조는 ATR-FTIR 분석을 통해 IL의 도입여부를 확인하였으며, 4 cm⁻¹의

Table 1. Compositions of the Hydrogel or Ionic Conductive Hydrogel

	γ -PGA (%)	LAP (mM)	DPBS:IL (w/w%)
IG ₀	5	5	10:0
IG ₂	5	5	8:2
IG ₄	5	5	6:4
IG ₆	5	5	4:6

분해능에서 200회 스캔하여 4000-400 cm⁻¹의 스펙트럼 범위에서 분석하였다.

이온전도성 수화젤의 투명성 평가. 수화젤 및 이온전도성 수화젤의 광투과율은 UV-Vis spectrophotometer(UV-2600, Shimadzu, Japan)를 사용하여 측정하였다. 수화젤의 투과도는 1 mm의 두께의 석영 셀 내부에서 광교를 진행한 뒤 측정하였다. 이온전도성 수화젤의 투명성은 가시광선 영역(400-800 nm)의 투과율을 통해 평가하였으며, 이온전도성 수화젤을 1 × 2.5 × 0.5 cm³의 크기로 잘라 투명성을 확인하였다.

이온전도성 수화젤의 기계적 물성 평가. 이온전도성 수화젤의 기계적 특성은 texture analyzer(EZ-SX, Shimadzu, Japan)를 사용하여 평가하였다. 시료는 직사각형 모양(50 × 10 × 1 mm³)으로 준비하여 100 mm/s의 속도로 인장강도를 측정하였다. Elongation at break(EAB, %)와 tensile strength(TS, MPa)는 다음 식을 통해 계산하였다.

$$EAB (\%) = \Delta L/L \times 100 \quad (2)$$

여기서 L은 초기 시료의 길이(mm)이며, ΔL 은 파단 시 시료 길이의 차이이다.

$$TS (\text{kPa}) = F_t/A_t \quad (3)$$

여기서 F_t 는 시료가 파단 시까지 받는 최대 하중이며, A_t 는 초기 시료의 단면적(두께 × 폭, mm²)이다.

이온전도성 수화젤의 전기적 특성 분석 및 스트레인 센서로의 적용성 평가. 전도성은 digital graphical sampling multimeter (DMM7510 7.5, Keithley, USA)를 사용하여 평가하였다. 간단히, 1 V의 전압을 가해 변화하는 전류값을 측정하였다. 전도성을 평가하기 위해 모든 시료는 길이 33 mm, 반지름이 2.14 mm인 원통형 모양으로 준비하였고 probe를 2 point로 찍어 평가하였다. 전도도(σ)는 아래의 식으로 계산되었으며 모든 측정은 5번 수행되었다(n=5).

$$\sigma (\text{S/m}) = \frac{L}{R \times A} \quad (4)$$

여기서, L은 두 probe 사이의 거리(cm), R은 이온전도성 수화젤의 저항(Ω), A는 단면적(cm²)이다.

이온전도성 수화젤의 실시간 모니터링 특성은 digital graphical sampling multimeter(DMM7510 7.5, Keithley, USA)를 사용하여 측정하였다. 이온전도성 수화젤을 구리 테이프를 이용하여 모션감지 위치에 부착하였으며 multimeter에 전압을 가해 움직임에 따른 전류의 변화를 실시간으로 모니터링 하였다.

통계 분석. 모든 정량적 데이터는 평균 \pm 표준편차(SD)로 표시된다. 결과는 one-way analysis of variance(ANOVA)을 사용하여 분석한 후 Tukey's post hoc test로 해석하였다.

결과 및 토론

γ -PGA-GMA의 합성 및 구조적 특성 분석. γ -PGA의 카복시기는 GMA의 에폭시 고리의 개환을 통해 쉽게 개질될 수 있다(Figure 2(a)). γ -PGA-GMA의 합성은 ^1H NMR 스펙트럼으로 확인하였다(Figure 2(b)). γ -PGA는 4.16 ppm에서 α -proton에 의한 피크가 관찰되었으며, GMA가 γ -PGA에 도입됨에 따라 6.20 ppm과 5.77 ppm에서 두 개의 특성 피크가 새롭게 나타났다. 이는 GMA의 vinyl group proton에 기인한다.¹² GMA의 치환도는 GMA의 vinyl group proton과 γ -PGA의 α -proton peak의 면적비를 통해 계산되었으며, 3.81%의 치환도를 나타내었다.¹³

수화젤은 광가교반응을 통해 간단히 제조되었고, ATR-IR

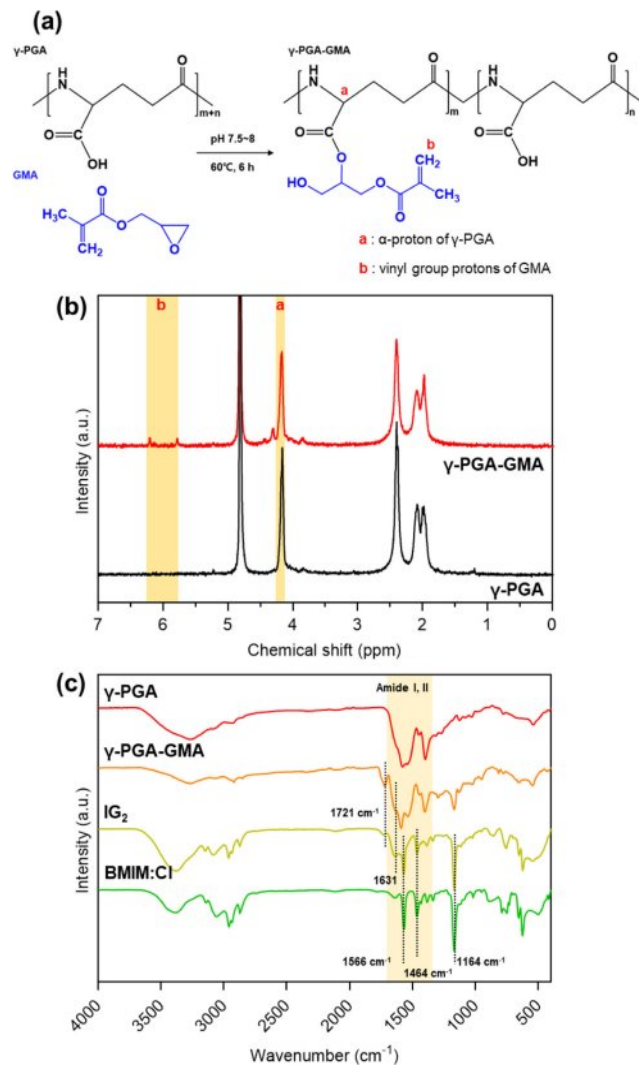


Figure 2. Synthesis of γ -PGA-GMA: (a) schematic of γ -PGA-GMA synthesis; (b) ^1H NMR spectrum; (c) ATR-IR spectrum of γ -PGA-GMA.

스펙트럼을 사용하여 γ -PGA 수화젤의 화학구조 분석을 진행하였다. γ -PGA는 3400 cm^{-1} 에서 O-H 및 N-H의 수소결합에 의한 피크가 관찰되었으며, 1400 cm^{-1} 과 1700 cm^{-1} 사이에서 아마이드 I, II에 의한 밴드가 관찰되었다. γ -PGA는 GMA로 개질됨에 따라 1716 및 1642 cm^{-1} 에서 각각 C=O 신축진동 및 C=C 신축진동에 의한 피크가 관찰되었다.^{14,15} 또한, γ -PGA 수화젤에 BMIM:Cl이 도입됨에 따라 BMIM:Cl의 피크가 나타났다. BMIM:Cl은 1566 , 1464 , 1164 cm^{-1} 에서 특징적인 피크를 나타냈는데, 각각 1566 cm^{-1} 에서 이미다졸륨 고리의 C-C, C-N 신축진동에 기인한 피크와 1464 cm^{-1} 에서 CN-CH₃ 신축진동에 의한 피크가 관찰되었으며 1164 cm^{-1} 에서는 이미다졸륨 고리의 평면 C-H 진동에 의한 피크가 관찰되었다. 이는 기존의 연구결과와 일치하며,¹⁶ γ -PGA 기반 수화젤에 IL이 성공적으로 함유되었음을 확인하였다.

이온전도성 수화젤의 투명성 평가. 웨어러블 디바이스를 제조함에 있어 투명성은 심미적인 부분과 재활 분야에 이점을 갖는다. 일반적으로 재활용 센서는 민감도에 의존하여 데이

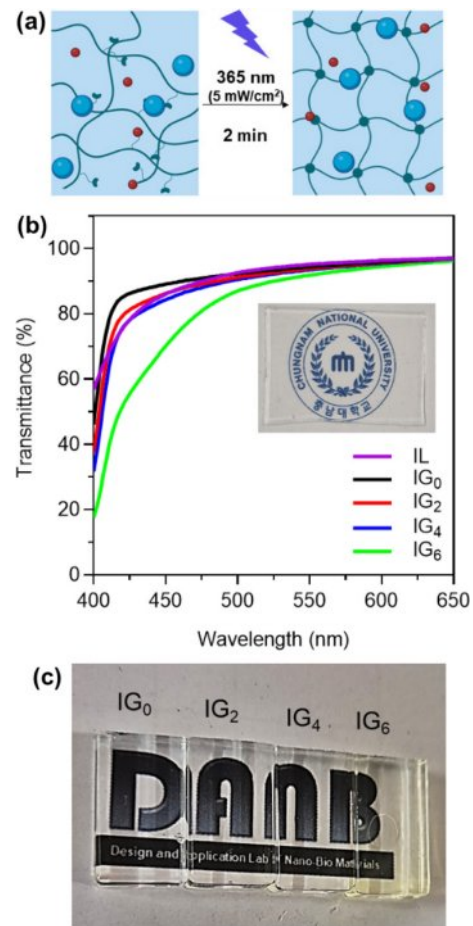


Figure 3. (a) light-mediated gelation mechanism γ -PGA-GMA hydrogel; (b) transmittance of IG_x and IL in the visible-light region; (c) photographs of IG_x above the letters.

터 수집이 이루어진다. 또한, 센서가 투명하면 수술 후 손상된 조직의 시각적 정보를 추가적으로 수집할 수 있기 때문에 직관적으로 회복과정을 관찰할 수 있다.

수화젤은 광가교를 통해 제조되었으며 이온성 액체가 수화젤 내부에 존재한다(Figure 3(a)). Figure 3(b)는 제조한 수화젤의 가시광선 영역에서의 투과도를 나타낸 것이다. 모든 수화젤은 660 nm에서 투명성을 평가하였으며,¹⁷ 97% 이상의 매우 우수한 투과도를 나타내었다. Figure 3(c)는 본 연구에서 제조된 이온전도성 수화젤의 투명성을 평가한 사진으로, 각 수화젤은 뒷면의 글씨를 명확히 확인할 수 있을 정도로 우수한

투명성을 보였다. 이때, IG₆ 시료가 연황색을 나타내는 이유는 이온성 액체로 도입된 BMIM:Cl이 연황색을 나타내기 때문이다.

이온전도성 수화젤의 기계적 물성 평가. Figure 4(a)는 제조한 IG의 stress-strain(S-S) 곡선을 나타낸 것으로, IG₄는 140%까지 신장되었으며, 이는 신체의 비틀림, 굽힘 등을 측정하기에 충분한 신장률을 나타낸다.¹⁸ IL의 비율이 증가함에 따라 IG의 인장강도는 점차 감소하였으며, 파단신도는 점차 증가하는 경향을 보였다. 이는 수화젤이 인장될 때 IL이 고분자 사슬 사이에서 윤활제 역할을 하여 마찰을 줄여 수화젤이 인장될 때 받는 스트레스가 감소하기 때문이다.¹⁹ 이러한 경향은 S-S 곡선에서 확인할 수 있는 초기탄성계수(초기 기울기)로도 확인할 수 있으며, IL 함량이 증가함에 따라 수화젤의 초기탄성 계수가 감소하였다. 그러나 과량의 IL을 함유하는 수화젤의 경우(IG₆), 고분자 사슬에 첨가된 IL이 결점으로 작용하며 기계적 물성이 저하되었다.⁹

이온전도성 수화젤의 이온전도도 평가. 수화젤은 다공성 내부구조에 기인하여 우수한 이온전도도를 가진다. 본 연구

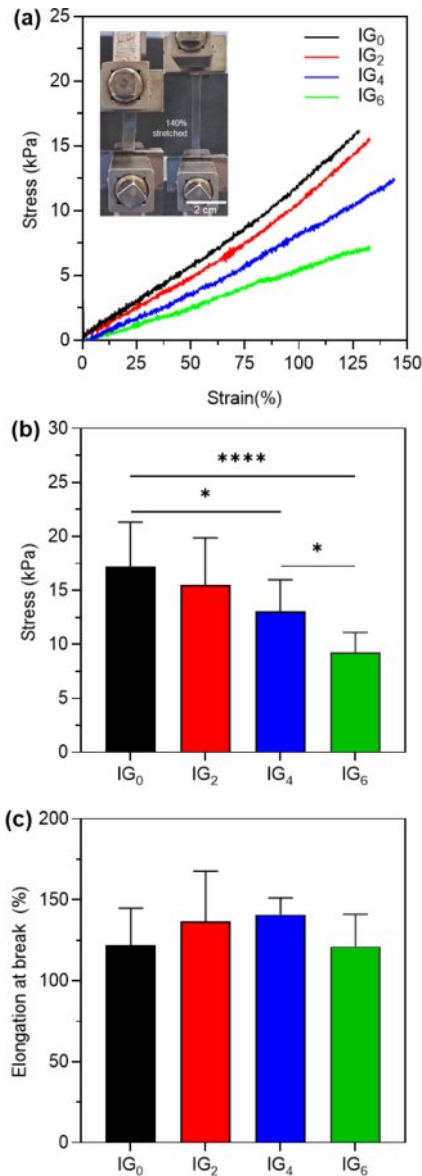


Figure 4. Mechanical properties of IG_x: (a) stress–strain curves. IG₄ can stretch 140%; (b) tensile strength; (c) elongation at break (n = 6) of each sample.

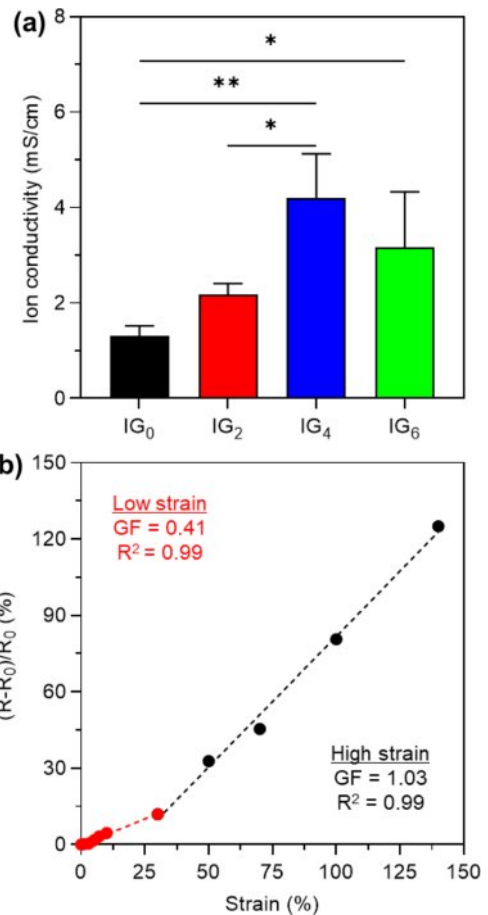


Figure 5. Electrical characteristics of γ -PGA-GMA hydrogel: (a) ion conductivity of IG_x; (b) gauge factor result of IG₄ hydrogel.

에서 제조한 IG_x 의 이온전도도를 평가하여 Figure 5(a)에 나타내었다. IG_0 의 경우, 1.31 mS/cm의 비교적 낮은 전도도를 갖는 반면, IL의 함량이 증가할수록 IG_2 와 IG_4 의 이온전도도는 각각 2.17, 4.19 mS/cm로 증가하였다. 그러나, IG_6 은 3.16 mS/cm로 오히려 이온전도도가 감소하였는데, 과량의 IL 함량으로 인해 이온의 이동이 억제되었기 때문이다.⁹ 따라서, 과

단신율이 140%이고, 이온전도도가 가장 높은 IG_4 시료를 사용하여 다양한 전기적 특성을 평가하였다. 먼저, 변형률에 대한 모션감지의 민감도를 나타내는 정량적 지표인 gauge factor (GF)를 계산하기 위해 다양한 변형 범위에서 저항의 변화를 측정하여 Figure 5(b)와 같이 나타내었다. 제조한 이온전도성 수화젤의 GF는 낮은 변형률 범위(0-30%)에서 0.41이었으며, 높은 변형률 범위(30-140%)에서 1.03으로 증가했다. 각각의 범위에서, R^2 이 0.99를 나타내며 금속 스트레인 센서와 유사한 정도의 높은 신뢰도를 나타내었다.²⁰

이온전도성 수화젤의 스트레인 센서로의 응용. 스트레인 센서는 신체 관절의 굽힘 및 비틀림을 측정함으로써 재활 및 운동 모니터링 등을 수행할 수 있다.²¹ 따라서, 우수한 이온전도성과 선형 GF를 갖는 IG_4 를 이용하여 신체 부상이 잦은 손가락, 팔꿈치, 아킬레스건의 굽힘을 측정하였다(Figure 6). 이때, 손가락의 굽힘 속도에 따른 각각의 저항변화율(Figure 6(a))과 아킬레스건(Figure 6(b)), 그리고 팔꿈치(Figure 6(c))의 움직임에 따라 각각의 다른 저항 변화율을 나타내어 움직임을 효율적으로 감지할 수 있었다. 결과적으로, 본 연구에서 제조한 IG_4 는 움직이는 속도에 따라, 그리고 움직임의 정도를 민감하게 측정하여 재활 및 운동 모니터링으로의 응용 가능성을 확인하였다.

결론

본 연구에서는 생체적합성이 우수한 γ -PGA와 이온성 액체 BMIM:Cl을 도입하여 이온전도성 수화젤을 제조하였다. γ -PGA를 GMA로 개질하고, UV 조사를 통해 광가교형 수화젤을 제조하였다. 수화젤 제조 시, 이온성 액체와 DPBS의 비율을 달리하여 IL 함량에 따른 물리/화학적 및 전기적 특성을 분석하였다. GMA로 개질된 γ -PGA의 치환도는 ¹H NMR 스펙트럼 분석을 통해 확인하였으며, ATR-IR 스펙트럼을 통해 수화젤에 IL이 성공적으로 도입되었음을 확인하였다. 이온전도성 γ -PGA-GMA 수화젤은 우수한 투명성을 나타내었으며, IL 도입을 통해 수화젤이 연신될 때 사슬 사이 마찰을 줄여주는 윤활제 역할을 하여 파단신도를 증가시키고 파단강도를 감소시켰다. 수화젤은 IL의 함량이 증가함에 따라 최대 140%까지 늘어날 수 있었으나, 일정수준 이상의 IL 첨가는 수화젤의 물성과 이온 전도성을 오히려 감소시켰다. 본 연구에서 제조한 IG_4 는 우수한 전도성과 연신에 따른 저항변형이 높은 신뢰도를 가져 재활기간 중 신체의 비틀림, 굽힘 정도를 측정하기 적합하다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 제조한 이온전도성 수화젤은 재활 분야에 활용될 수 있는 스트레인 센서로서 잠재력을 가지고 있음을 확인하였다.

감사의 글: 본 연구는 충남대학교의 학술연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

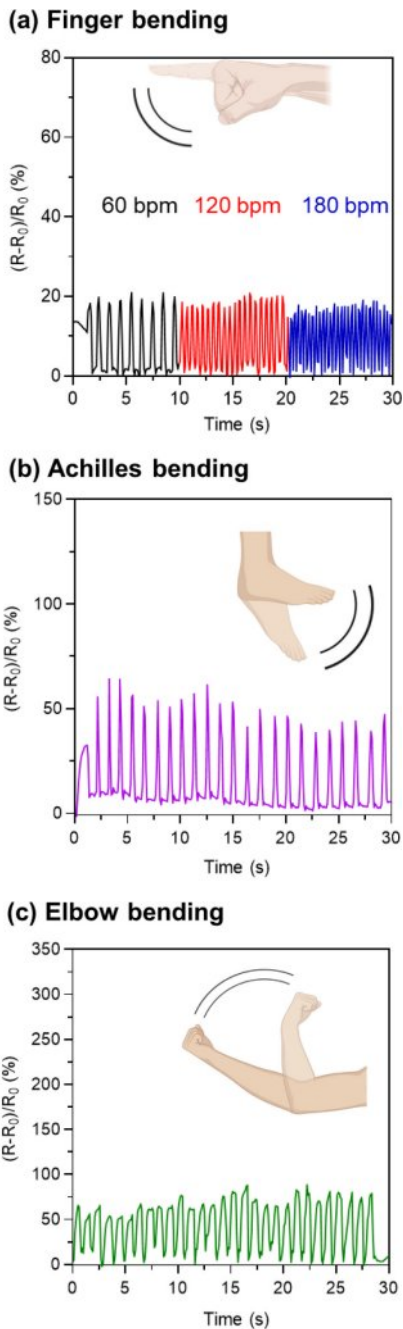


Figure 6. Practical application of IG_4 for motion detection during rehabilitation: (a) finger bending with different speed (60, 120 and 180 bpm); (b) achilles tendon bending; (c) elbow bending.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

- Shin, H. W.; Kim, H. K. Ion Conducting Polymer Networks for Implementing Ionotronics Devices. *News Information Chem. Eng.* **2021**, *39*, 647-654.
- Wang, Z.; Zhang, L.; Liu, J.; Li, C. Highly Stretchable, Sensitive, and Transparent Strain Sensors with a Controllable In-Plane Mesh Structure. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, *11*, 5316-5324.
- Liu, Y.; Wang, L.; Mi, Y.; Zhao, S.; Qi, S.; Sun, M.; Peng, B.; Xu, Q.; Niu, Y.; Zhou, Y. Transparent Stretchable Hydrogel Sensors: Materials, Design and Applications. *J. Mater. Chem. C* **2022**, *10*, 13351-13371.
- Lim, H. R.; Kim, H. S.; Qazi, R.; Kwon, Y. T.; Jeong, J. W.; Yeo, W. H. Advanced Soft Materials, Sensor Integrations, and Applications of Wearable Flexible Hybrid Electronics in Healthcare, Energy, and Environment. *Adv. Mater.* **2020**, *32*, 1901924.
- Chen, N.; Zhang, H.; Li, L.; Chen, R.; Guo, S. Ionogel Electrolytes for High-performance Lithium Batteries: A Review. *Adv. Energy Mater.* **2018**, *8*, 12, 1702675.
- Qin, Z.; Sun, X.; Yu, Q.; Zhang, H.; Wu, X.; Yao, M.; Liu, W.; Yao, F.; Li, J. Carbon Nanotubes/hydrophobically Associated Hydrogels as Ultrastretchable, Highly Sensitive, Stable Strain, and Pressure Sensors. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, *12*, 4944-4953.
- Fan, X.; Pan, S.; Xia, M.; Yin, J.; Li, H.; Sun, Z.; Zhan, Y.; Zhang, Y. Transparent, Highly Stretchable, Fully Self-recoverable Ionic Hydrogel for Flexible Ultra-sensitive Sensors. *Mater. Res. Bull.* **2022**, *146*, 111627.
- Li, M.; Xu, H.; Luo, M.; Qing, X.; Wang, W.; Zhong, W.; Liu, Q.; Wang, Y.; Yang, L.; Zhu, X. Wearable Ionogel Fiber-based Ionic Thermoelectric Device for Low-grade Human Body Heat Harvesting. *Chem. Eng. J.* **2024**, *485*, 149784.
- Huang, Y.; Zhao, X.; Ke, J.-L.; Zha, X.-J.; Yang, J.; Yang, W. Engineering Nanoscale Solid Networks of Ionogel for Enhanced Thermoelectric Power Output and Excellent Mechanical Properties. *Chem. Eng. J.* **2023**, *456*, 141156.
- Zhou, Y.; Fei, X.; Tian, J.; Xu, L.; Li, Y. A Ionic Liquid Enhanced Conductive Hydrogel for Strain Sensing Applications. *J. Colloid Interface Sci.* **2022**, *606*, 192-203.
- Kim, Y. M.; Moon, H. C. Ionoskins: Nonvolatile, Highly Transparent, Ultrastretchable Ionic Sensory Platforms for Wearable Electronics. *Adv. Funct. Mater.* **2020**, *30*, 1907290.
- Yang, R.; Wang, X.; Liu, S.; Zhang, W.; Wang, P.; Liu, X.; Ren, Y.; Tan, X.; Chi, B. Bioinspired Poly(γ -glutamic acid) Hydrogels for Enhanced Chondrogenesis of Bone Marrow-derived Mesenchymal Stem Cells. *Int. J. Biol. Macromol.* **2020**, *142*, 332-344.
- Bae, S. B.; Kim, M. H.; Park, W. H. Electrospinning and Dual Crosslinking of Water-soluble Silk Fibroin Modified With Glycidyl Methacrylate. *Polym. Degrad. Stab.* **2020**, *179*, 109304.
- Wang, R.; Guo, K.; Zhang, W.; He, Y.; Yang, K.; Chen, Q.; Yang, L.; Di, Z.; Qiu, J.; Lei, P.; Gu, Y.; Luo, Z.; Xu, X.; Xu, Z.; Feng, X.; Li, S.; Yu, Z.; Xu, H. Poly- γ -Glutamic Acid-Microgel-Encapsulated Probiotics with Gastric Acid Resistance and Smart Inflammatory Factor Targeted Delivery Performance to Ameliorate Colitis. *Adv. Funct. Mater.* **2022**, *32*, 2113034.
- Sun, A.; He, X.; Li, L.; Li, T.; Liu, Q.; Zhou, X.; Ji, X.; Li, W.; Qian, Z. An Injectable Photopolymerized Hydrogel with Antimicrobial and Biocompatible Properties for Infected Skin Regeneration. *NPG Asia Mater.* **2020**, *12*, 25.
- Putz, A. M.; Len, A.; Trif, L.; Horváth, Z. E.; Almásy, L. Imidazolium Ionic Liquids as Designer Solvents Confined in Silica Nanopores. *Gels* **2022**, *8*, 388.
- Roy, S.; Rhim, J. W. Agar-based Antioxidant Composite Films Incorporated with Melanin Nanoparticles. *Food Hydrocoll.* **2019**, *94*, 391-398.
- Jung, D.; Kim, S. Y.; Sohn, A.; Jeon, B. Y.; Kim, S. Y.; Lee, J. Y. Regional Skin Maximal Elongation Rate for Applying E-textiles to Tight-Fit Clothing. *Korean J. Community Living Sci.* **2017**, *28*, 365-375.
- Zhou, Y.; Qu, J. Ionic Liquids as Lubricant Additives: a Review. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2017**, *9*, 3209-3222.
- Qiu, A.; Li, P.; Yang, Z.; Yao, Y.; Lee, I.; Ma, J. A Path Beyond Metal and silicon: Polymer/nanomaterial Composites for Stretchable Strain Sensors. *Adv. Funct. Mater.* **2019**, *29*, 1806306.
- Zhang, Y.; Dai, Y.; Xia, F.; Zhang, X. Gelatin/polyacrylamide Ionic Conductive Hydrogel with Skin Temperature-triggered Adhesion for Human Motion Sensing and Body Heat Harvesting. *Nano Energy* **2022**, *104*, 107977.

출판자 공지사항: 한국고분자화학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.