

## 천연 고분자 한천 하이드로젤의 접촉도에 따른 소수성 제어 및 특성 분석

김희진 · 조윤나 · 조성우 · 김윤곤 · 류희욱<sup>†</sup> · 정재현<sup>†</sup>

숭실대학교 화학공학과

(2015년 12월 17일 접수, 2015년 12월 31일 수정, 2015년 12월 31일 채택)

## Tuning the Hydrophobicity of Agar Hydrogel with Substituent Effect

Hee Jin Kim, Yoon Na Cho, Sung Woo Cho, Yun-Gon Kim, Hee Wook Ryu<sup>†</sup>, and Jae Hyun Jeong<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Soongsil University, 369 Sangdo-ro, Dongjak-gu, Seoul 06978, Korea

(Received December 17, 2015; Revised December 31, 2015; Accepted December 31, 2015)

**초록:** 천연 고분자인 한천 하이드로젤은 다량의 수분을 함유하고 있기 때문에 접촉각이 매우 작은 극친수성 표면 성질을 갖게 된다. 본 연구에서는 다양한 범위의 소수성을 갖는 한천 하이드로젤을 제조하였다. 이소시아네이트기를 갖는 알킬사슬을 아가로스 분자에 도입하여 소수성 아가로스 분자를 합성하였다. 최적 접촉도를 갖는 아가로스 분자와 순수 한천분자와의 혼합비를 조절하여 다양한 친수성/소수성 정도(접촉각 10~90°)를 갖는 한천 하이드로젤을 제조할 수 있었고 팽윤비 측정, 내부구조 분석, 기계적 물성 분석 및 표면 접촉각 측정을 통해 물리적, 구조적 특성을 확인하였다. 소수성 한천 하이드로젤은 미생물배지, 전기영동 젤, 조직공학용 생체재료, 나아가 기능성 물질의 동물대체 효능시험을 위한 맞춤형 시편으로 다양하게 활용될 수 있다.

**Abstract:** Natural polymer agar-forming hydrogel exhibits such a high hydrophilic character for absorbing large quantities of water in a 3D cross-linked network structure. This study presents an advanced integrative strategy to control the hydrophobicity of the agar hydrogel. We synthesized the hydrophobically modified agarose (HMA, Agarose-g-C<sub>18</sub>) substituted with octadecyl chains, consisting of the optimized degree of substitution (DS). Then, *in situ* hydrogel forming of agars with HMAs, varying mixing ratios, generated the agar hydrogels that possess various hydrophilic/hydrophobic balances. We analyzed the physical and structural properties *via* DSC, SEM, UTM, and contact angle for substitution effects. Overall, this new strategy to prepare the agar hydrogel with hydrophilic/hydrophobic balances would greatly serve to facilitate a wide array of the agars used in microorganism culturing, electrophoresis, tissue engineering, cosmetic research, etc.

**Keywords:** agar hydrogel, hydrophobicity, degree of substitution, contact angle.

## 서 론

천연 복합 고분자의 일종인 한천분자(agar)는 이중 나선결합을 갖는 3차원 하이드로젤(hydrogel) 형태로 제조되어 미생물배지, 전기영동 젤, 조직공학용 생체재료, 나아가 식용 및 산업용으로 폭 넓게 사용되고 있다.<sup>1-6</sup> 최근에는 기능성 물질 및 화장품의 효능시험을 위한 시편으로 개발되어 임상 및 동물대체시험법 최적화에 활용된 연구도 보고되었다.<sup>7</sup> 한천 하이드로젤은 수용액상에서 무질서하게 존재하는 졸(sol) 상태의 한천분자를 향한 가압하여 물리적 자가결합을 통해 다량의 수분을 함유할 수 있는 3차원 망상구조를 갖는 젤(gel) 형

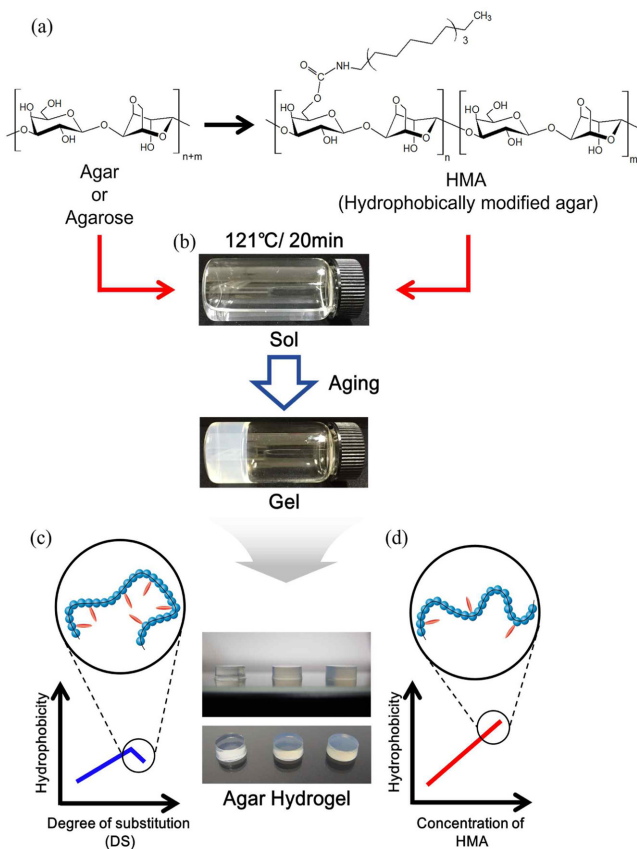
태로 제조된다.<sup>8-10</sup> 하이드로젤의 기공 크기(pore size), 기계적 강도(mechanical stiffness), 흡수율 및 팽윤비 등의 물리적, 구조적 성질은 한천분자의 농도에 따라 제어 가능하다. 또한 다양한 관능기를 고분자 다당류 backbone에 도입하면 화학적 성질 제어도 가능하다. 폴리비닐알콜(PVA), 폴리카프로락톤(PCL) 등의 합성 고분자 및 젤라틴(gelatin), 콜라겐(collagen) 등의 생체 고분자와 결합시켜 다양한 물성을 갖도록 변형이 가능하다.<sup>11,12</sup>

이번 연구에서는, 한천 하이드로젤의 물리적, 구조적 특성들은 일정하게 유지하면서, 친수성/소수성 정도를 제어하는 실험을 진행하였다. 한천 하이드로젤은 다량의 수분을 함유하고 있기 때문에 접촉각(contact angle)이 매우 작은 극친수성 표면 성질을 갖게 된다. 조직공학용 인공 세포외기질(ECM, extracellular matrix), 기능성 물질 효능시험을 위한 동물대체 시편 및 다양한 산업적 응용을 위해서는 극친수성 하이드로

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: nfejhh@ssu.ac.kr; hwryu@ssu.ac.kr

©2016 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.



**Figure 1.** Schematic description of preparing the agar hydrogel with hydrophilic/hydrophobic balances.

젤 표면에 소수성을 부여하여 친수성/소수성 정도를 제어할 필요성이 있다. 일반적으로 한천분자에 다양한 소수성 분자단을 화학적으로 결합하여 하이드로젤 표면 소수성을 부여하는 방법을 사용한다(Figure 1(a), (b)). 그러나 Figure 1(c)에서 보는 것처럼 단순히 소수성 분자단의 결합 정도를 늘리는 것으로는 일정 이상의 소수성 값을 갖지 못하는 기술적 한계를 보인다.

때문에 본 연구에서는, 한천 하이드로젤의 친수성/소수성 정도를 제어하는 새로운 방법을 적용하여 제조된 다양한 소수성 하이드로젤의 특성 분석을 수행하였고, 나아가 한천 하이드로젤의 소수성을 나타내는 메커니즘을 제시하였다. 먼저, 아가로스(agarose)와 아가로펙틴(agarpectin)으로 구성된 순

수 한천분자 중 아가로스에 알킬기를 가지고 있는 소수성 분자단을 도입하고(Figure 1(a)), 순수 한천분자와 혼합하여 한천 하이드로젤을 제조하였다(Figure 1(b)). 한천분자에 도입된 소수성 분자단의 접목도(DS, degree of substitution)를 조절하여, 최적 접목도를 갖는 소수성 한천분자(HMA, hydrophobically-modified agarose)를 합성하였다. 소수성 아가로스 분자와 순수 한천분자와의 혼합비를 조절하여 다양한 친수성/소수성 정도를 갖는 한천 하이드로젤(Figure 1(d))을 제조할 수 있었다. 소수성 한천분자의 화학적 구조는  $^1\text{H}$  NMR(nuclear magnetic resonance spectroscopy)과 FTIR(fourier transform infrared spectroscopy)로, 열적 특성은 DSC(differential scanning calorimetry)로 측정하였다. 친수성/소수성 정도가 제어된 한천 하이드로젤의 물리적, 구조적 특성은 팽윤비 측정, 주사전자현미경을 통한 내부구조 분석, 만능재료시험기를 통한 기계적 물성 분석 및 표면 접촉각 측정을 통해 확인하였다. 본 연구에서 제조된 소수성 한천 하이드로젤은 미생물배지, 전기영동 젤, 조직공학용 생체재료, 나아가 기능성 물질 효능시험을 위한 동물대체 시편으로 다양하게 활용될 수 있다.

## 실 험

**소수성이 접목된 아가로스(Agarose-g-C<sub>18</sub>) 합성.** 아가로스(Sigma)를 디메틸설폭사이드(DMSO, Sigma)에 5.0 wt% 함량으로 첨가하고 교반하면서 30~40 °C에서 충분히 용해하였다. 완전 용해되면 상온, 질소 대기 하에서 옥타데실 이소시아네이트(octadecyl isocyanate, Sigma)를 천천히 첨가하고 8 시간 이상 교반하면서 반응시켰다. 반응이 끝난 후 에틸에테르(ethyl ether, 삼전화학)를 이용하여 침전시키고 여러 번 세척하였다. 그 후 진공 건조하여 소수성이 도입된 아가로스 분자를 얻었다. 한천 하이드로젤 제조에 사용하기 전에는 수분에 노출되지 않도록 합성한 아가로스 분자를 건조 환경에서 보관하였다. 소수성이 접목된 아가로스(Agarose-g-C<sub>18</sub>, agarose grafted with alkyl chains)는 Table 1과 같이 접목도(DS)를 조절하여 합성하였다.

**Agarose-g-C<sub>18</sub>의 구조 및 특성 분석.** 합성한 Agarose-g-C<sub>18</sub>은 DMSO-d<sub>6</sub>에 녹여 400 MHz에서  $^1\text{H}$  NMR(Avance II, Bruker Biospin)로 구조를 분석하였다. 아가로스 분자의 분자량 및 합성 후 안정성은 MALDI-TOF MS(matrix-assisted laser desorption/ionization, Bruker)로 분석하였다.<sup>13</sup> 또한

**Table 1. Molecular Characterization**

Sample	Agarose (AC0)	Agarose-g-C <sub>18</sub> (AC1)	Agarose-g-C <sub>18</sub> (AC2)	Agarose-g-C <sub>18</sub> (AC3)
Feed <sup>a</sup>	100/0	95/5	90/10	80/20
DS <sub>C18</sub> <sup>b</sup>	0	1.4	4.2	5.7

<sup>a</sup>Feed mole ratio (mol%, agarose unit/octadecyl isocyanate). <sup>b</sup>Degree of substitution determined based on  $^1\text{H}$  NMR of graft copolymers.

Agarose-g-C<sub>18</sub>과 KBr(Sigma) 펠릿을 만들어 FTIR(IS 50, Thermo Fisher Scientific)로 구조 분석을 병행하였다. 아가로스 분자의 열적 특성은 DSC(DSC821<sup>+</sup>, Mettler Toledo)를 이용하여, 승온 속도 10 °C/min, 온도 범위 0~150 °C에서 측정하였다.

**한천 하이드로젤의 제조.** Agarose-g-C<sub>18</sub>를 이용한 한천 하이드로젤을 제조하기 위해 수용액 상에서 순수 한천 분자(Yakuri pure chemicals)에 Agarose-g-C<sub>18</sub>를 첨가한다. 순수 한천분자와 Agarose-g-C<sub>18</sub>의 혼합 비율을 0~50 wt%로 조절하였다. 한천 수용액을 120 °C에서 20분 항온 가압하여 졸(sol) 상태로 만든다. 이후 상온에서 천천히 냉각하고 숙성(aging)하여 젤(gel)화시켜 최종적으로 소수성이 도입된 한천 하이드로젤을 제조한다.

**한천 하이드로젤 분석.** 제조된 한천 하이드로젤을 증류수에 최소 12시간 이상 담가 충분히 팽윤시키고, 이것을 60 °C에서 최소 6시간 이상 건조시킨 후 각각의 무게를 측정하였다. 팽윤비(Q<sub>m</sub>)는 다음의 식을 이용하여 계산된다. 여기서 W<sub>s</sub>는 팽윤된 한천의 무게를, W<sub>d</sub>는 건조된 한천의 무게를 나타낸다.

$$Q_m = \frac{W_s - W_d}{W_d} \quad (1)$$

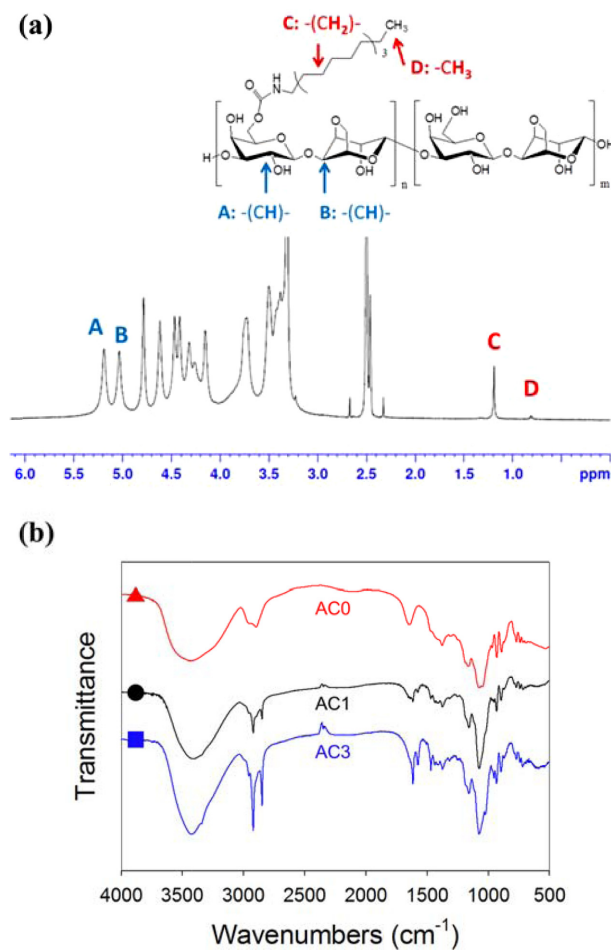
한천 하이드로젤의 내부구조(microstructure)는 주사전자현미경(FE-Scanning electron microscope, JEOL-7001F)을 이용하여 관찰하였다. 한천 하이드로젤의 표면 특성을 관찰하기 위해 접촉각 측정 기기(DSA100, Krüss)를 이용하여 접촉각을 측정하였다. 모든 한천 하이드로젤은 제조 후 증류수에서 12시간 이상 팽윤시킨 후 접촉각 측정에 사용하였으며 측정 직전 증류수에서 꺼내 표면의 증류수를 제거한 후 측정에 사용하였다. 측정은 상온, 실내에서 진행되었으며, 증류수 액적 4.0 μL를 사용하여 접촉각을 측정하였다. 한천 하이드로젤의 기계적 특성은 만능재료시험기(universal testing machine, UTM, DrTech) 장치를 이용하여 수행하였다. 압축 강도를 위한 한천 하이드로젤은 지름 8 mm, 높이 1 mm로 규격화하였으며, 각각 총 5개의 샘플을 제작하여 측정하였다. 만능재료시험기의 설정 값은 측정거리 시험비율 10%, 시험 속도 0.5 mm/min, 하중 범위는 1.0 kg로 동일하게 적용하였다. 한천 하이드로젤을 이용한 보습력 측정 실험은 항온(31 °C), 항습(상대습도 60%)에서 수분손실률(%)을 측정하여 비표면적당 수분손실량(mg/cm<sup>2</sup>·h)을 계산하였다. 여기서 m<sub>0</sub>는 시료의 초기 질량이고, m<sub>t</sub>는 임의 시간 t(min)에서 시료의 질량, D는 용기의 지름, h는 임의시간이다. 모델 보습제로 사용한 보습제-1(faceoil)와 보습제-2(lipstick)는 각각 2 mg/cm<sup>2</sup> 양을 도포하여 사용하였다.

$$\text{Moisture loss (\%)} = \frac{(m_0 - m_t)}{m_0} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Flux (mg/cm}^2 \cdot \text{h)} = \frac{(m_0 - m_t)}{\frac{\pi D^2}{4} \cdot h} \quad (3)$$

### 결과 및 토론

**소수성이 접목된 아가로스(Agarose-g-C<sub>18</sub>) 합성.** 소수성이 도입된 아가로스(Agarose-g-C<sub>18</sub>)는 순수 아가로스 분자(agarose-OH, M<sub>w</sub>: 116000 g/mol)를 옥타데실 이소시아네이트(OCN-C<sub>18</sub>H<sub>37</sub>)로 치환하여 성공적으로 합성하였다. Agarose-g-C<sub>18</sub>은 Table 1과 같이 치환된 알킬사슬의 접목도(degree of substitution)에 따라 합성하였고, AC1, AC2, AC3로 명명하였다. 접목도는 아가로스의 반복 단위(3,6-anhydro-L-galactose와 D-galactose) 분자 100개 당 소수성으로 치환된 분자 수를 의미한다(식 4). 식 (5)에서 n은 Figure 2(a) 분자식에서 보는 것과 같이, 소수성으로 치환된 단위 분자 수, m은 치환되지 않은 단위 분자 수를 나타낸다.



**Figure 2.** (a) <sup>1</sup>H NMR; (b) FTIR spectra of Agarose-g-C<sub>18</sub> with AC0(▲), AC1(●), and AC3(■).

$$DS_{C_{18}} (\%) = \frac{n}{n+m} \times 100 \quad (4)$$

$$DS (\%) = \frac{(\text{The integral of the peak}_{0.7-0.9\text{ppm}})/3}{(\text{The integral of the peak}_{4.9-5.2\text{ppm}})} \times 100 \quad (5)$$

접목도는 Figure 2(a)의 <sup>1</sup>H NMR의 분석결과에서 아가로스 분자의 반복 단위가 나타내는 특성 피크(B: -CH-)와 옥타데실 사슬의 특성 피크(D: -CH<sub>3</sub>) 분석 값을 사용하여 식 (3)과 같이 계산하였다.<sup>14</sup> MALDI-TOF 분석 결과 치환반응으로 인해 아가로스 분자의 급격한 분자량의 감소 없이 소수성 분자가 안전하게 아가로스 backbone에 접목된 것을 확인할 수 있었다. Figure 2(b)에서 볼 수 있듯이 FTIR 분석결과 Agarose-g-C<sub>18</sub>의 접목도가 증가할수록 3400 cm<sup>-1</sup> 영역에서 확인되는 하이드록실기(-OH) 특성 피크에 비해, 2900 cm<sup>-1</sup> 영역의 알킬 사슬의 특성 피크 및 1700 cm<sup>-1</sup> 영역의 이소시아네이트 특성 피크 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Figure 3은 Agarose-g-C<sub>18</sub>의 DSC 열분석 결과이다.

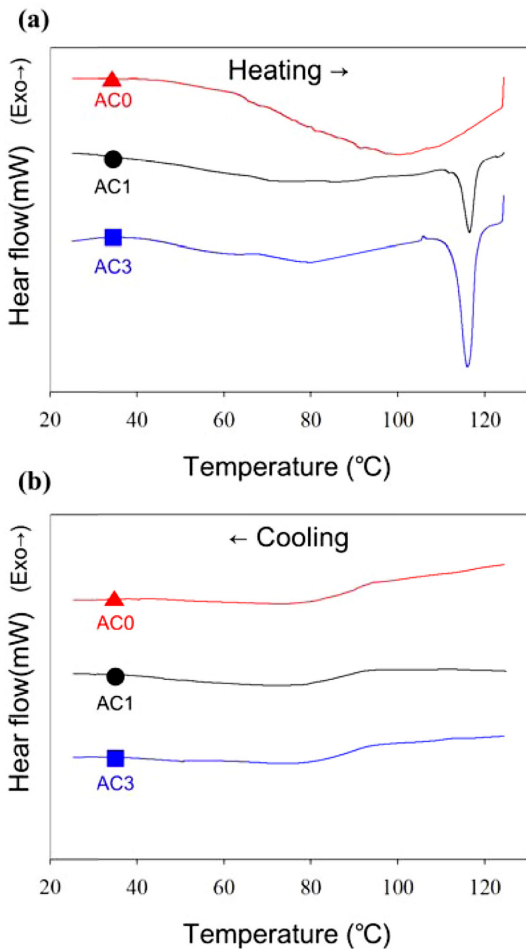


Figure 3. DSC thermogram of Agarose-g-C<sub>18</sub> with AC0(▲), AC1(●), and AC3(■) for (a) heating; (b) cooling process.

승온(heating) 분석 결과 아가로스의 T<sub>m</sub>(80~100 °C) 뿐 아니라 알킬의 결정화 온도 T<sub>c</sub>가 115 °C에서 확인되었다.<sup>15</sup> 또한 냉각(cooling) 분석결과 Agarose-g-C<sub>18</sub>에서도 동일하게 아가로스가 갖는 유리전이온도(T<sub>g</sub>, 90 °C) 값을 보임을 확인할 수 있었다. 일반적으로 아가로스의 유리전이온도는 물 분자가 가소제(plasticizer) 역할을 하기 때문에 수분 함유량이 증가함에 따라 낮아지는 경향을 보인다.<sup>16</sup> 본 실험에서 열분석은 건조된 아가로스 분자를 사용하였기 때문에 상대적으로 높은 T<sub>g</sub>를 보였다. 이를 종합해 볼 때, 알킬분자가 아가로스 backbone에 성공적으로 DS에 따라 접목되었음을 알 수 있다. 또한 합성한 Agarose-g-C<sub>18</sub>는 아가로스의 구조적, 물리적 특성을 유지하고 있기 때문에, 순수 한천분자와 이중나선 결합을 통해 젤화에 참여할 수 있음을 확인할 수 있다.

**소수성 한천 하이드로젤.** 소수성 한천 하이드로젤을 제조하기 위해 수용액 상에서 순수 한천분자와 합성한 Agarose-g-C<sub>18</sub>를 혼합하였다. 이렇게 혼합한 한천 수용액을 120 °C에서 20분 항온 가압하여 졸(sol) 상태로 만든다. 이후 상온에서 천천히 냉각하고 숙성(aging)하여 젤화시켜 최종적으로 소수성이 도입된 한천 하이드로젤을 제조하였다(Figure 1(b)). 먼저, 순수 한천분자로만 농도를 1, 3, 5%로 달리하여 한천

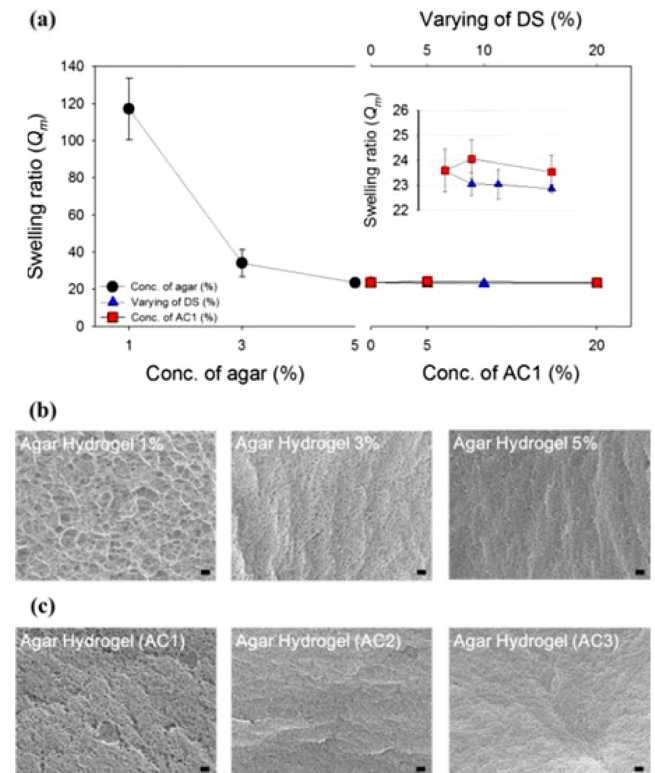


Figure 4. (a) Swelling ratio measured with total concentration of agar (●), degree of substitution (▲), and mixing ratio of AC1(■). FE-SEM images of agar hydrogel with (b) varying concentration; (c) DS (scale bar=1.0 μm).

하이드로젤을 제조하고 팽윤비를 측정한 결과는 Figure 4(a)와 같다. 농도를 줄이면 팽윤비가 20에서 120으로 급격히 증가하고, 이는 내부 기공 크기의 증가로 인한 것임을 주사현미경으로 확인할 수 있었다(Figure 4(b)).

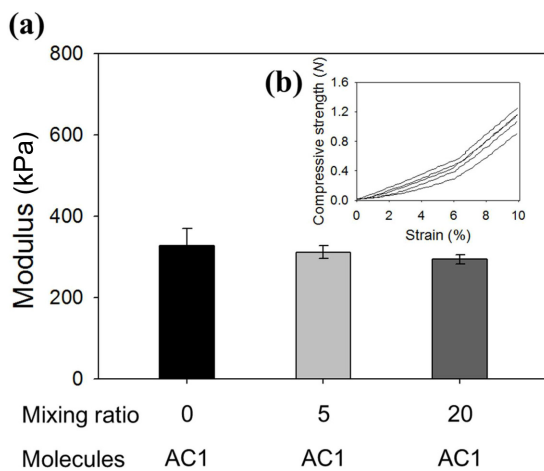
다음으로, 총 한천분자의 농도(total concentration, 순수 한천분자와 합성한 Agarose-g-C<sub>18</sub>의 전체 농도)는 동일하게 5%로 유지하고, 합성한 Agarose-g-C<sub>18</sub>와 순수 한천분자의 혼합비를 달리하여 한천 하이드로젤을 제조하였다. Figure 4(a)에서 보는 것과 같이, Agarose-g-C<sub>18</sub>의 혼합비를 순수 한천분자 대비 5에서 20%로 증가하여도 팽윤비는 크게 변하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 또한 총 한천분자의 농도를 5%로 고정하고, Agarose-g-C<sub>18</sub>의 혼합비도 5%로 고정된 후, 접목도를 5에서 20%로 증가하여도 한천 하이드로젤의 팽윤비는 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 주사현미경 결과 내부 기공 크기도 일정 수준에서 비슷한 크기를 갖는 것을 알 수 있었다(Figure 4(c)). 결과를 종합해 볼 때, Agarose-g-C<sub>18</sub> 분자는 한천 하이드로젤 제조 시, 다른 순수 한천분자와 균일하게 혼합되어 이중나선 구조를 이루며 젤화(gelation)되는 것을 알 수 있다. 때문에, 한천 하이드로젤의 기계적 강도에에도 합성한 Agarose-g-C<sub>18</sub>가 큰 영향을 주지 않았다. Figure 5(a)는 총 한천 농도 5%로 제조한 한천 하이드로젤의 변형률(compressive strain, %)에 대한 응력(stress)을 5번 반복 측정 한 결과를 나타낸 것이다. 한천 하이드로젤의 영 탄성률(*E*, elastic modulus)은 변형률에 대한 응력의 비로 계산하여, 각 샘플마다 측정된 평균값을 나타내었다. 한천 하이드로젤이 점탄성 거동(affined network model)을 보이는 변형률 10% 이하에서 측정 값을 얻었다.<sup>17</sup> Figure 5(b)에서 보는 것처럼 DS 1.4%를 갖는 AC3의 혼합비를 달리하여 한천 하이드로젤을 제조한 경우 모두 300 kPa 정도의 기계적 강도를 갖는 것을

확인할 수 있다.

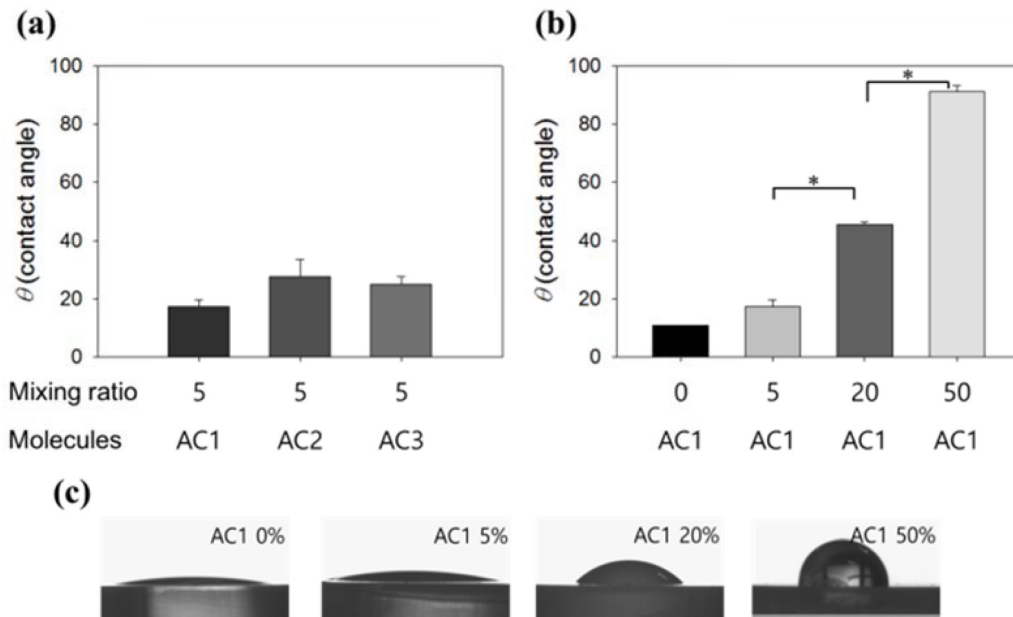
한천 하이드로젤 표면의 소수성 정도는 접촉각(contact angle)을 측정하여 분석하였다. 순수 한천분자로 제조한 하이드로젤은 접촉각이 모두 10° 미만으로 극친수성을 보였다. 반면에, Figure 6(a)에서 보듯이 AC1을 첨가한 경우 한천 하이드로젤 표면의 접촉각이 18°로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이때, 총 한천농도(5%) 및 순수 한천분자와 AC의 혼합비(mixing ratio, 5%)는 고정하였다. 그러나 접목도가 더 높은 AC2를 첨가하면 접촉각도 28°로 증가하지만, AC3(DS: 5.7%)를 첨가하면 접촉각이 25°로 다시 감소하는 결과를 보였다. 이는 단순히 소수성 분자의 접목도를 증가시키는 것으로는 한천 하이드로젤 표면의 접촉각을 일정 이상 높일 수 없음을 의미한다. 이러한 결과를 보이는 것은 아가로스 분자에 소수성 분자가 일정 이상 접목된 Agarose-g-C<sub>18</sub>의 경우, 수용액상에서 자기조립(self-assembly via hydrophobic interaction) 현상에 의해 소수성 분자단이 하이드로젤 표면에 노출되지 않기 때문이다. 이를 확인하기 위해, 낮은 접목도를 갖는 AC1(DS: 1.4%)을 사용하여 혼합비를 변화시킨 하이드로젤의 표면 접촉각을 측정하였다.

Figure 6(b)에서 보는 것같이, 혼합비를 50%로 높이면 접촉각이 90°까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 낮은 접목도를 갖는 Agarose-g-C<sub>18</sub>를 사용하여 혼합비를 조절하는 것이 다양한 범위의 소수성 표면을 갖는 한천 하이드로젤을 제조하는 효과적인 방법임을 알 수 있다. 뿐만 아니라 Table 1에서 보는 것처럼 일반적으로 소수성 분자단 치환 반응의 효율이 접목도가 클수록 현저히 떨어지기 때문에, 접목도가 낮은 Agarose-g-C<sub>18</sub>를 사용하는 것이 효율적이라 할 수 있다. 흥미로운 것은, AC3을 혼합비 5%로 만든 하이드로젤과 AC1을 혼합비 20%로 만든 하이드로젤은 거의 동량의 소수성분자단을 포함하고 있지만, 접촉각은 약 1.9배 차이가 나는 것을 볼 수 있다. Figure 6(c)는 AC1의 혼합비를 조절하여 만든 하이드로젤의 접촉각 측정 이미지이다.

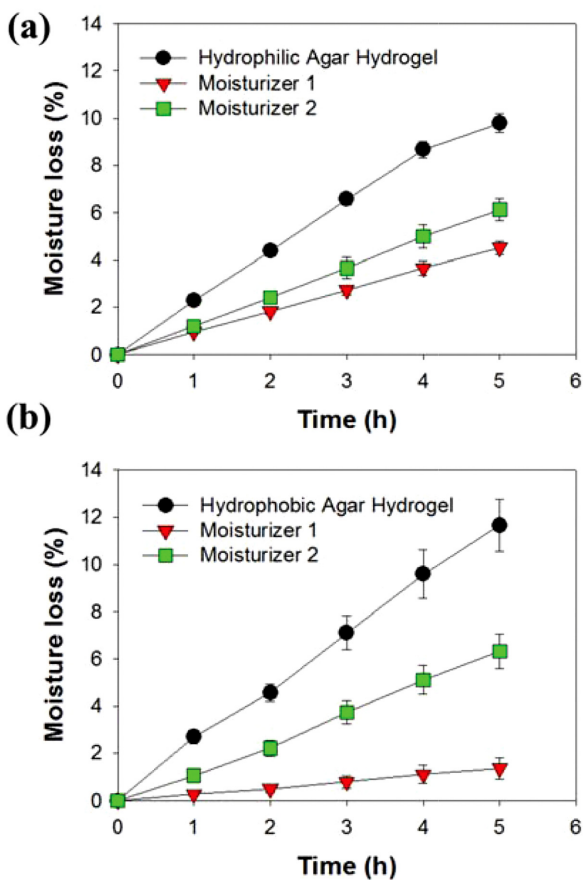
**소수성 한천 하이드로젤의 응용.** 본 연구에서 제조된 소수성 한천 하이드로젤은 미생물배지, 전기영동 젤, 조직공학용 생체재료, 나아가 기능성 물질 동물대체 효능시험을 위한 시편으로 다양하게 활용될 수 있다. Figure 7은 한천 하이드로젤에 다양한 보습제를 도포하여 보습력을 확인한 결과이다. 31 °C, 상대습도 60%에서 접촉각 10°와 48°를 갖는 한천 하이드로젤은 동일한 수분손실률(28 mg/cm<sup>2</sup>·h)을 보인다. 친수성 및 소수성 표면에 보습제-1을 도포한 경우, Figure 7(a)와 (b)에서 보는 것같이, 모두 수분손실률(15 mg/cm<sup>2</sup>·h)이 동일한 비율로 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 흥미롭게도 보습제-2를 도포하면 소수성 하이드로젤에서 수분손실률(5 mg/cm<sup>2</sup>·h)이 친수성 하이드로젤(11 mg/cm<sup>2</sup>·h)에서 보다 더욱 현저하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 보습제-2와 소수성 하이드로젤 표면과의 상호작용이 더 좋기 때문에, 즉 발



**Figure 5.** Mechanical properties of agar hydrogel. (a) Elastic modulus (*E*) of agar hydrogel, varying mixing ratio; (b) Compressive strain and stress curves.



**Figure 6.** Contact angle measurements of agar hydrogel, (a) varying DS; (b) mixing ratio with AC1 (\**p*<0.05); (c) experimental images of contact angle measurements.



**Figure 7.** Moisturizing effects on the (a) hydrophilic; (b) hydrophobic agar hydrogels.

립성이 좋기 때문에 일어나는 현상이다. 이러한 결과는 지성 및 건성 피부에 대한 맞춤형 보습제 개발 및 연구에 다양한 소수성 범위를 갖는 한천 하이드로젤의 응용 가능성을 시사하는 것이다. 결론적으로 본 연구에서 제시한 방법으로 제조된 소수성 한천 하이드로젤은 물리적 또는 구조적 물성 변화 없이 친수성/소수성 정도를 제어할 수 있기 때문에 미생물배지, 전기영동 젤, 세포외기질을 모사한 조직공학용 생체재료, 동물대체 효능시험 시편 등 다양한 분야에 활용될 수 있다.

### 결론

본 연구에서는 다양한 범위의 소수성을 갖는 한천 하이드로젤을 제조하였다. 이소시아네이트기를 갖는 알킬사슬을 아가로스 분자에 도입하여 소수성 아가로스 분자를 합성하였다. 최적 점목도(low DS)를 갖는 아가로스 분자와 순수 한천 분자와의 혼합비를 조절하는 방법을 도입하여, 기존의 단순 점목도를 조절하는 방법으로는 얻지 못했던 다양한 친수성/소수성 정도(접촉각 10~90°)를 갖는 한천 하이드로젤을 제조할 수 있었다. 본 연구에서 제조된 아가 하이드로젤은 친수성/소수성 정도가 제어된 맞춤형 시편으로 다양하게 활용될 수 있다.

**감사의 글:** 본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 기술료지원사업(10048242)의 지원을 받아 수행된 연구이므로 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. T. Matsushashi, *J. Food Sci.*, **42**, 1369 (1977).
2. S. Shankar and J. W. Rhim, *Carbohydr. Polym.*, **130**, 353 (2015).
3. L. E. Bertassoni, M. Cecconi, V. Manoharan, M. Nikkhah, J. Hjortnaes, A. L. Cristino, G. Barabaschi, D. Demarchi, M. R. Dokmeci, Y. Yange, and A. Khademhosseini, *Lab. Chip.*, **14**, 2202 (2014).
4. C. W. Park, S. Y. Lee, and W. Hur, *Korean J. Biotechnol. Bioeng.*, **22**, 239 (2007).
5. H. G. Kim, O. D. Kim, and H. J. Son, *Korean J. Food Nutr.*, **10**, 228 (1997).
6. E. Y. Kim, H. M. Kim, J. E. Song, H. S. Lee, C. Joo, and G. Khang, *Polym. Korea*, **38**, 702 (2014).
7. J. H. Jeong, H. W. Ryu, Y. Kim, and H. J. Kim, Korean Patent 10-2015-0063104 (2015).
8. W. Zhang, L. Piculell, and S. Nilson, *Macromolecules*, **25**, 6165 (1992).
9. S. Arnott, A. Fulmer, W. E. Scott, I. C. M. Dea, R. Moorhouse, and D. A. Rees, *J. Mol. Biol.*, **90**, 269 (1974).
10. K. B. Guiseley, *Carbohydr. Res.*, **13**, 247 (1970).
11. W. Karntarat, P. Bhinyo, T. Wannapong, and T. Darapond, *Polym. Korea*, **32**, 537 (2000).
12. S. S. Singh, V. K. Aswal, and H. B. Bohidar, *Polymer*, **50**, 5589 (2009).
13. Y. Kim, C. Sung, S. Lee, K. Kim, Y. Yang, H. W. Ryu, and Y. Kim, *Anal. Chem.*, **87**, 858 (2015).
14. G. Siqueira, J. Bras, and A. Dufresne, *Langmuir*, **26**, 402 (2010).
15. M. Mitsuiki, Y. Yamamoto, A. Mizuno, and M. Motoki, *J. Agric. Food Chem.*, **46**, 3528 (1998).
16. T. Hatakeyama, K. Nakamura, and H. Hatakeyama, *Jpn. J. Polym. Sci. Technol.*, **53**, 795 (1996).
17. J. H. Jeong, J. J. Schmidt, C. Cha, and H. Kong, *Soft Matter*, **6**, 3930 (2010).