



논문

가지형 가교제를 접목한 VOCs 흡수용 소수성 겔 특성 분석

Analysis of Properties of Lipophilic Gel Integrated with Grafted Crosslinker for Absorbing VOCs

신성규, 정나슬, 김희진, 정재현*
 숭실대학교 화학공학과

Sung Gyu Shin, Naseul Jung, Hee-Jin Kim, Jae Hyun Jeong*
 Department of Chemical Engineering, Soongsil University

접수일 2018년 12월 7일
 수정일 2019년 1월 2일
 채택일 2019년 1월 2일

Received 7 December 2018
 Revised 2 January 2019
 Accepted 2 January 2019

*Corresponding author
 Tel : +82-(0)2-828-7043
 E-mail : nfejhh@ssu.ac.kr

Abstract In this study, a grafted crosslinker, poly (succinimide) grafted methacrylate (PSI-g-MA) composed of poly (succinimide) as the hydrophobic backbone was prepared with various degree of substitution (DS) by introducing acrylic group. The polymers were synthesized by acid-catalyzed polycondensation reaction and DS was confirmed by ¹H-NMR. Then, we prepared lipophilic gel for absorbing VOCs with silicone monomer and PSI-g-MA. The mechanical strength and the VOC absorbancy of the lipophilic gel were optimized by controlling the DS of PSI-g-MA with fixing the number of acrylic groups. We analyzed the physical properties of lipophilic gels by measuring expansion ratio (S), swelling ratio (Q), and Young's modulus (E). Generally, swelling ratio of lipophilic gel decreases as mechanical strength increases. However, the lipophilic gel of this study can 'independent control' to control the mechanical strength with superior swelling ratio. In addition, lipophilic gels can be prepared to customized form for each type of VOCs. Overall, this lipophilic gel for absorbing VOCs prepared with grafted cross linker, PSI-g-MA, and silicon monomer would greatly used in various researches of organic chemical engineering, atmospheric engineering and environmental engineering.

Key words: VOCs, Lipophilic gel, Grafted crosslinker, Degree of substitution, Independent control

1. 서론

전 세계적으로 산업이 발달하고 인구가 증가함에 따라 각종 오염원의 배출량이 증가하고 있는 가운데, 특히 휘발성 유기화합물 (Volatile organic compounds, VOCs)과 같은 유해물질이 대기, 토양 및 수계로 배출되어 문제가 되고 있다. VOCs는 상온, 상압에서 액체나 고체상으로 존재할 수 있으며, 대기 중에서는 높은 증기압으로 인해 쉽게 증발되는 탄화수소화합물을 의미한다. VOCs는 토양, 습지, 초지와 같은 자연 환경에서 일부 배출되지만 (Guenther *et al.*, 1995), 일

반적으로 유기용제 사용시설, 자동차 및 산업시설에서 상대적으로 많은 양이 배출된다 (Yang *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2017). VOCs는 증발된 이후에 악취가 나고, 대기 중에서 광화학 반응을 일으켜 광화학 스모그를 유발할 수 있다 (Shen *et al.*, 2013). 또한, 발암성을 지닌 독성 물질로서 인간에게 장기간 노출 시 심각한 영향을 초래하며, 다량 섭취 시에는 급성, 만성 중독현상, 발암, 유전자 변이 및 기형 등을 유발할 수 있다 (Padhi and Gokhale, 2014).

산업 시설에서 배출되는 VOCs를 저감 및 제거하기 위해 VOCs 흡착법과 화학적 산화법에 대한 연구

가 이루어져왔다. VOCs 흡착법은 산업 시설에서 배출되는 VOCs를 다양한 흡착물질로 대기에 용존하는 VOCs를 제거할 수 있지만, 기존 설비에 응축 및 분리 시설과 흡착 후 흡착물질을 세척 및 처리 시설을 더 구비해야 한다는 단점이 있다(Yun and Kim, 2017; Fang *et al.*, 2016; Dumont *et al.*, 2012; Darracq *et al.*, 2012). UV 반응기와 이온 플라즈마 공정과 같은 화학적 산화법도 대기 상에 존재하는 VOCs를 제거하는데에 이용될 수 있으나, 산화 과정에서 응집, 침전과 같은 과정을 수행하기 위해 넓은 시설 부지와 높은 에너지가 필요하다는 단점이 있다(Kang *et al.*, 2017; Park and Jo, 2014). 또한, VOCs를 저감하기 위한 수단으로 응축, 저장, 침전, 분리와 같은 VOCs 흡수 과정을 포함한 장치나 설비에서 VOCs를 유입할 때 불규칙적으로 고농도의 VOCs가 유입되는 현상이 발생한다. 이는 환경 조건에 따라 급격한 온도 상승을 초래하여 안전사고의 발생을 높이며, 이에 따라 VOCs 처리 장치에서 불규칙적 또는 간헐적으로 유입되는 고농도의 VOCs를 신속하게 흡수할 수 있는 전처리

댐핑(damping) 기술이 필요하다(Zhang *et al.*, 2017; Muzenda, 2013).

최근에는 소수성 고분자와 실리콘 오일(silicon oil)을 이용하여 VOC 흡수 및 제거용 소재를 제조함으로써, 기존의 VOCs 제거용 설비 대신 이용하거나, 종래의 대형 설비에 적용하여 설비 내 VOCs의 과도한 축적을 방지하기 위한 방법이 연구되고 있다(Montes *et al.*, 2011; Darracq *et al.*, 2010; Ono *et al.*, 2007). 소수성 고분자 겔을 이용하여 VOCs를 회수하는 방법들이 보고되고 있으나, 소수성 겔을 이용하여 VOCs를 흡수시키는 경우, 겔의 VOCs 흡수율이 높아짐에 따라 겔의 기계적 강도가 저하되어 중국에는 겔이 붕괴되기 때문에 상용화하기에는 한계가 있었다.

본 연구에서는 소수성 전구체에 아크릴기(acrylate)의 도입 정도를 조절하여 가지형 가교제로 합성하였고 이를 사용한 VOCs 흡수용 소수성 겔의 특성분석을 수행하였다. 먼저, 아스파르트산을 중합하여 소수성 전구체인 PSI(poly(succinimide))로 합성하고 아크릴기를 가지고 있는 분자단을 도입하였다(그림 1(a)).

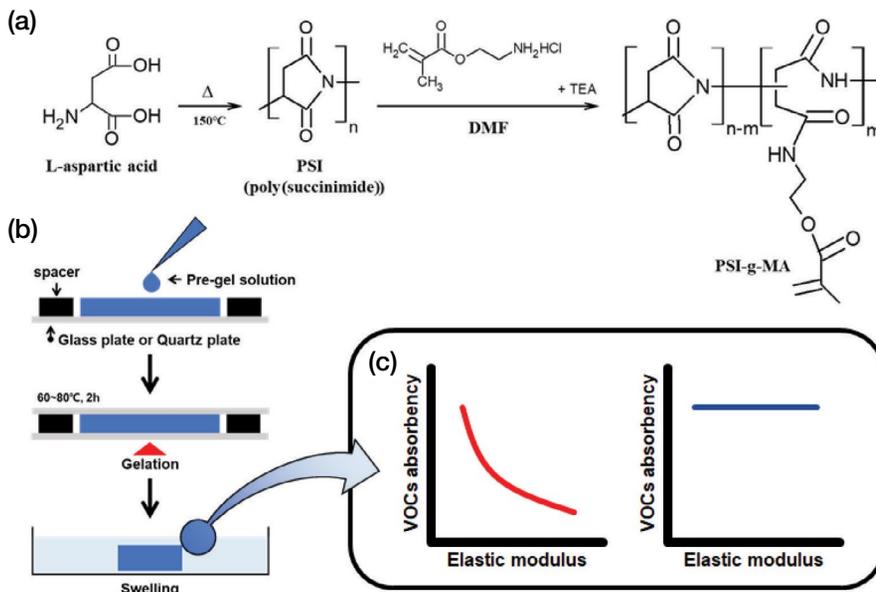


Fig. 1. (a) Overall synthesis scheme of PSI-g-MA. (b) Preparation of cross-linked lipophilic gel with PSI-g-MA and silicon monomer. (c) Analysis mechanical properties of lipophilic gel.

이때 소수성 전구체인 PSI에 도입된 아크릴기 분자단의 접목도 (degree of substitution, DS)를 조절하여, 다양한 접목도를 갖는 소수성 가지형 가교제를 합성하였다. 이후 실리콘 단량체와 혼합하여 소수성 겔을 제조하였고(그림 1(b)), VOCs 용액 상에서 팽윤 거동과 기계적 특성을 분석할 수 있었다. 다양한 접목도를 갖는 소수성 가지형 가교제는 ¹H-NMR (nuclear magnetic resonance spectroscopy)로 분석하였고, VOCs 흡수용 소수성 겔의 물리적, 구조적 특성은 팽창비 및 팽윤비 측정, 만능재료시험기를 통한 기계적 물성 분석을 통해 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제조된 VOCs 흡수용 소수성 겔은 기계적 강도는 증가시키면서 VOCs 흡수율은 유지하는 독립제어 (independent control)가 가능하였으며(Cha *et al.*, 2009), 이는 VOCs 흡수장치, 고농도 VOCs 전처리 댐핑장치, 폐수정화 시스템, 나아가 대기 환경공학 연구의 시편으로 다양하게 활용될 수 있다.

2. 실험 방법

2.1 메타크릴레이트가 접목된 PSI (PSI-g-MA) 합성

아스파르트산(L-aspartic acid, Samchun, Korea)과 인산(phosphoric acid, Sigma, USA)을 용매인 술폴란(sulfolane, Sigma, USA)에 첨가하여 150°C에서 10시간 동안 반응시켰다. 생성된 물은 Dean-stark trap을 이용하여 지속적으로 제거하였다. 그 후, 과량의 메탄올(methanol, Samchun, Korea)에 침전시킨 후, pH가 7이 될 때까지 증류수로 세척하여 전구체 고분자인 PSI (poly (succinimide))를 얻었다(Jeong *et al.*, 2012). 합성한 PSI를 디메틸포름아마이드(dimethylformamide, Sigma, USA)에 녹인 후, 2-아미노에틸 메타크릴레이트 염산염(2-amino ethyl methacrylate hydrochloride, Sigma, USA)과 트리에틸아민(triethylamine, Sigma, USA)을 1:3의 몰 비율로 첨가하여 24시간 동안 질소

대기 하에 반응시켰다. 이후, 반응 혼합물 내에 형성된 염(TEA-HCl)을 실린지 필터(0.45 μm, Nylon, Corning)로 제거하였다. 생성물은 과량의 에터(ethyl ether, Samchun, Korea)에 침전시켜 세척한 후, 80°C에서 건조하여 메타크릴레이트가 도입된 PSI (PSI-g-MA, 그림 1)를 얻었다(Cha *et al.*, 2011). 메타크릴레이트가 접목된 PSI는 표 1과 같이 접목도(degree of substitution)를 조절하여 합성하였다. 합성한 PSI-g-MA는 DMSO-*d*₆에 녹여 400 MHz에서 ¹H-NMR (Avance II, Bruker)로 구조를 분석하였다.

2.2 VOCs 흡수용 소수성 겔의 제조

PSI-g-MA를 이용한 VOCs 흡수용 소수성 겔을 제조하기 위해 디메틸설폭사이드(dimethyl sulfoxide, DMSO, Sigma, USA) 상에서 실리콘 단량체 3-트리메톡시실릴프로필 메타크릴레이트(3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate, MPTS, Sigma, USA)에 PSI-g-MA를 첨가하였다. 단량체의 아크릴기 수는 2.0 mmol, 가교제의 아크릴기 수는 0.04 mmol로 모든 접목도의 PSI-g-MA에 적용하였고 DMSO 상에서 젤 용액(pegel solution)을 제조하였다. 개시제로 아조비스이소부티로니트릴(azobisisobutyronitrile, AIBN, Sigma, USA) 0.04 mmol을 젤 용액에 첨가하였다(Ono *et al.*, 2007). 혼합된 젤 용액을 sigmacote[®] (Sigma, USA)로 코팅된 석영판 사이에 두께 1 mm로 도입하였고 60~80°C에서 2시간 동안 가열하여 중합시켰다. 이후 8 mm 바이옵시 펀치(biopsy punch, Miltex, USA)를 사용하여 두께 1 mm, 직경 8 mm의 VOCs 흡수능 및 물성 분석을 위한 소수성 겔로 규격화하였다(Jung *et al.*, 2018; Kim

Table 1. Molecular characteristics of methacrylated PSI.

Sample	Feed ^a	DS ^b	Number ^c
PSI	100/0	-	-
M10-PSI	90/10	6	12
M20-PSI	80/20	13	25
M30-PSI	70/30	17	33

^aFeed mole ratio (mol%, succinimide unit/methacrylate), ^bDegree of substitution (mol%) determined based on ¹H-NMR of graft copolymers, ^cNumber of methacrylates per one polymer chain

et al., 2016). 규격화된 소수성 겔은 DMSO에 상에서 2번 세척하여 미반응물을 제거하였고, 24시간 동안 VOCs 용액에 담지하여 완전 팽윤시켰다. VOCs 용액으로는 DMSO와 톨루엔(toluene, Sigma, USA)을 사용하였다.

2.3 VOCs 흡수용 소수성 겔의 물성 분석

제조된 소수성 겔은 VOCs 용액에 최소 6시간씩 3번 담지하여 충분히 팽윤시키고 내부 DMSO를 VOCs 용액으로 용매를 교체하였다. VOCs 흡수용 소수성 겔의 VOCs 흡수능은 소수성 겔의 팽윤비(swelling ratio, Q_m)를 통해 분석하였다. 팽윤비는 제조된 소수성 겔의 팽윤 정도를 확인하기 위한 지표로서, 팽윤된 겔의 무게(W_s)와 건조된 겔의 무게(W_d)를 이용하여 다음의 식을 이용하여 계산된다(Cho et al., 2017; Chan et al., 2010; Cha et al., 2009).

$$Q_m = \frac{W_s - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (1)$$

또한 제조된 소수성 겔을 VOCs 용액에서 팽윤시킨 후, 직경을 측정하여 팽창비(expansion ratio, S)를 계산할 수 있으며, 다음의 팽창비와 팽윤비의 관계식과 제조된 직후의 팽윤비(Q_i)를 사용하여 최종적인 팽윤비(Q_f)를 계산할 수 있다. 팽창비는 길이 방향에 대한 겔의 팽창 비율로, 제조한 직후 겔의 크기(x_i)와 완전 팽윤 후 겔의 크기(x_f)의 비로 나타낼 수 있다. 또한 밀도를 1로 가정한 겔의 무게(W)를 부피로 변환할 수 있으며 이는 곧 팽윤비의 비로 팽창비를 나타낼 수 있다(Beak et al., 2013).

$$S = \left(\frac{Q_f}{Q_i} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 = \frac{x_f}{x_i} - 1 \quad (2)$$

VOCs 흡수용 소수성 겔의 기계적 특성은 만능재료시험기(universal testing machine, UTM, DrTech, Korea) 장치를 이용하여 수행하였다. 압축 강도 측정을 위한 소수성 겔은 높이 1 mm, 직경 8 mm로 규격화하였으며, 각각 총 5개의 샘플을 사용하여 측정하였

다. 만능재료시험기의 설정 값은 측정거리 시험비율 12%, 시험 속도 0.2 mm/min, 하중 범위는 1.0 kgf로 동일하게 적용하였다(Jung et al., 2018; Kim et al., 2016).

$$E = \frac{\sigma(\epsilon)}{\epsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \quad (3)$$

식 (3)은 응력($\sigma(\epsilon)$)과 변형률(ϵ)의 비로 정의되는 영 탄성률(elastic modulus, E)를 나타낸다. 여기서 F 는 소수성 겔에 가해지는 힘, A 는 힘이 수직으로 닿는 소수성 겔의 면적, ΔL 은 대상 높이의 변화량, L_0 는 초기 높이를 의미한다.

VOCs 흡수용 소수성 겔의 팽윤 및 건조 거동을 확인하기 위해 VOCs 용액에서 완전 팽윤시킨 뒤 상온 대기 상에서 건조 과정을 진행하였다. 비교군으로 아크릴아마이드(acrylamide, Sigma, USA)와 메틸렌비스아크릴아마이드(N,N'-methylenebisacrylamide, Sigma, USA)로 중합된 하이드로겔을 소수성 겔과 동일한 규격으로 규격화하고 증류수에서 완전 팽윤시킨 뒤 상온 대기 상에서 45분 동안 소수성 겔과 건조시켰다(Jung et al., 2018; Cho et al., 2017). 대기 상에서 건조되는 동안 5분, 15분, 45분 간격으로 겔의 직경을 측정하였으며, 완전 건조된 겔은 다시 VOCs 용액 상에서 완전 팽윤 및 상온 대기상의 건조 과정을 반복 수행하였다.

2.4 통계 분석

표준편차를 포함한 오류 막대(error bar)는 모든 실험에 대해 5개의 시료 측정값으로 나타내었다. 통계적 유의성은 Turkey's multiple comparison test (T-test)를 활용하여 결정하였다(***, $p < 0.001$).

3. 결 과

3.1 PSI-g-MA의 구조 및 특성 분석

소수성이 도입된 PSI (M_w : 19000 g/mol)는 산 촉매 중축합 반응(acid-catalyzed polycondensation reac-

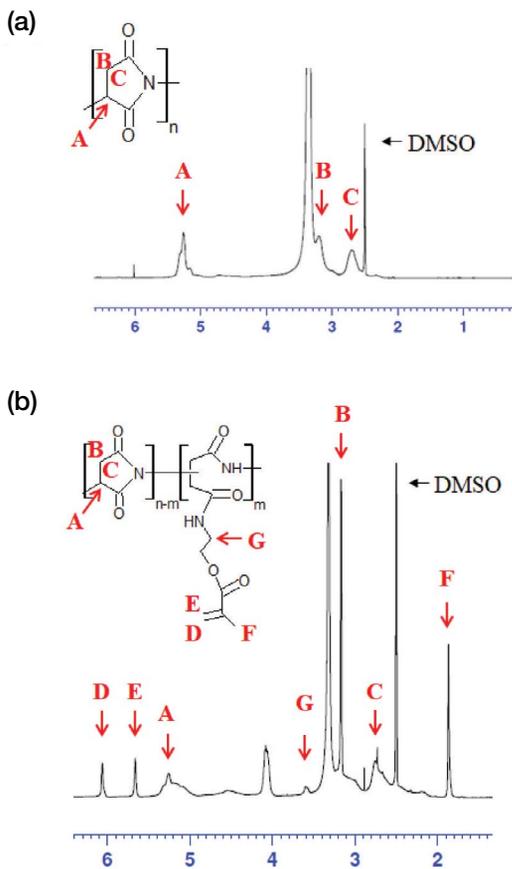


Fig. 2. ¹H-NMR spectrum and structure of (a) PSI; (b) PSI-g-MA.

tion)을 통해 최종적인 파워더 형태로 얻었다. 표 1과 같이 메타크릴레이트의 접목도에 따라 PSI unit당 feed mol%로 10%, 20%, 30%를 넣어 합성하였고, 각각을 M10-PSI, M20-PSI, M30-PSI로 명명하였다. 여기에서, 접목도는 PSI 반복 단위 분자 100개당 소수성으로 치환된 분자 수를 의미하며, Number는 고분자 사슬 한개 당 메타크릴레이트의 개수를 뜻한다. PSI-g-MA의 구조는 ¹H-NMR(그림 2) 결과를 통해 성공적으로 합성함을 확인하였다. PSI unit의 메틸렌 수소가 2.7 ppm과 3.2 ppm, 메타인 수소가 5.3 ppm, 도입된 아크릴레이트의 메틸렌 수소는 5.6 ppm과 6.0 ppm, 메틸 수소는 1.87 ppm에서 분석되었다. 실제 접목도는 PSI가 나타내는 특성 피크(C:-CH)와 MA의 특성

피크(F:-CH₃) 면적 값을 사용하여 계산하였다(식 4). 그 결과, 6%, 13%, 17%가 접목됨을 확인하였다.

$$DS_{MA}(\%) = \frac{\text{The integral of the peak 1.8} \sim \text{1.9 ppm}/3}{\text{The integral of the peak 5.1} \sim \text{5.5 ppm}} \times 100 \quad (4)$$

3.2 VOCs 흡수용 소수성 겔

VOCs 흡수용 소수성 겔을 제조하기 위해 DMSO 용액 상에서 실리콘 단량체인 MPTS와 합성한 PSI-g-MA를 혼합하였다. 혼합한 겔 용액은 코팅된 두 석영판 사이에서 높이 1 mm로 고정시켰으며, 60~80°C에서 2시간 동안 중합반응을 통해 제조하였다. 이후 8 mm 직경의 바이오피스 펀치를 사용하여 규격화하고 DMSO 용액에 담지하여 미반응물을 제거함과 동시에 완전 팽윤시켜 최종적으로 VOCs 흡수용 소수성 겔을 제조하였다(그림 1(b)). 먼저, 가지형 가교제의 PSI backbone에 아크릴기의 접목도를 6%, 13%, 17%로 달리하여 VOCs 흡수용 소수성 겔을 제조하고 VOCs 용액에서의 완전 팽창 후의 직경의 크기를 측정하여 팽창비를 계산하였다. DMSO와 톨루엔 모두에서 접목도가 6%에서 17%까지 증가함에 따라 팽창비 값이 감소하는 경향을 보이나 감소하는 구배가 완만한 구간이 있음을 확인하였다(그림 3(a)). DMSO에서는 접목도가 증가함에 따라 0.30에서 0.11까지 팽창비의 감소가 본 실험의 모든 접목도에서 완만한 구간을 가졌고, 톨루엔에서는 팽창비가 0.78에서 0.30까지 상대적으로 큰 변화 폭을 가졌으며, 접목도 13~17%까지는 완만한 감소를 나타냈다.

다음으로, 소수성 겔의 팽창비를 사용하여 팽윤비를 계산하였다. 팽윤비 또한 PSI-g-MA의 접목도가 증가함에 따라 팽윤비 값이 감소하는 경향을 보였고, 팽창비와 비슷한 완만한 감소 경향을 가짐을 확인하였다(그림 3(b)). DMSO에서는 접목도가 증가함에 따라 186%에서 126%까지 팽윤비의 감소가 본 실험의 모든 접목도에서 완만한 구간을 가졌다. 톨루엔에서는 478%에서 203%까지 상대적으로 큰 변화 폭을 가졌으나, 본 연구의 접목도 13~17%에서는 205%에서 203%까지 팽윤비의 완만한 감소를 확인할 수 있었다. 이

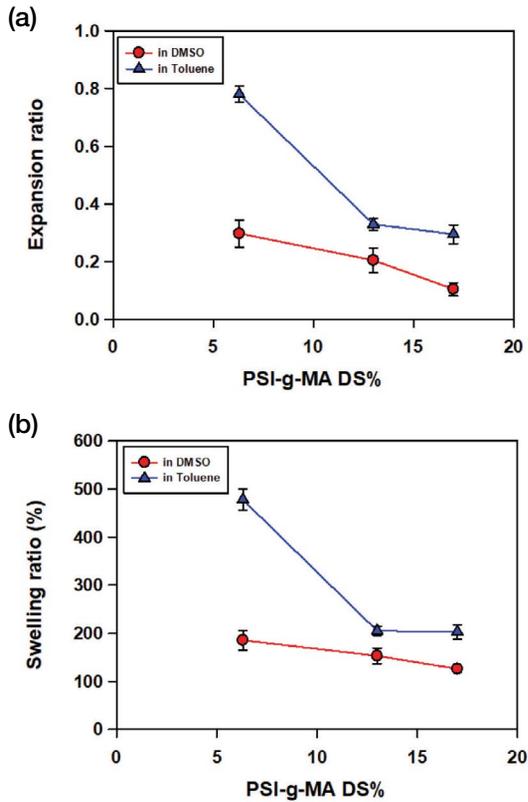


Fig. 3. (a) Expansion ratio and (b) swelling ratio measured with degree of substitution (DS) of PSI-g-MA in DMSO (●) and toluene (▲).

는 소수성 PSI-g-MA의 특정 접목도 범위에서 가교 정도를 증가시켜도 팽윤비 즉, VOCs 흡수용 소수성 겔의 VOCs 용액을 흡수할 수 있는 능력이 크게 변하지 않음을 보여주는 결과이다. 또한, 본 연구에서 제조된 소수성 겔은 VOCs 용액 마다 팽윤할 수 있는 능력이 달랐으며, 이는 VOCs 맞춤형 VOCs 흡수용 소수성 겔을 제조할 수 있음을 보여주는 결과이다.

규격화 된 소수성 겔을 DMSO 상에서 완전 팽윤시킨 뒤 기계적 강도를 만능재료시험기로 영 탄성률 측정을 수행하였다. 일반적으로 3차원 고분자 망상구조의 겔은 가교제의 함량과 단량체의 함량이 증가할수록 기계적 강도가 높아지는 경향을 갖는다. 본 연구에서는 소수성 겔을 제조함에 있어 아크릴기 수를

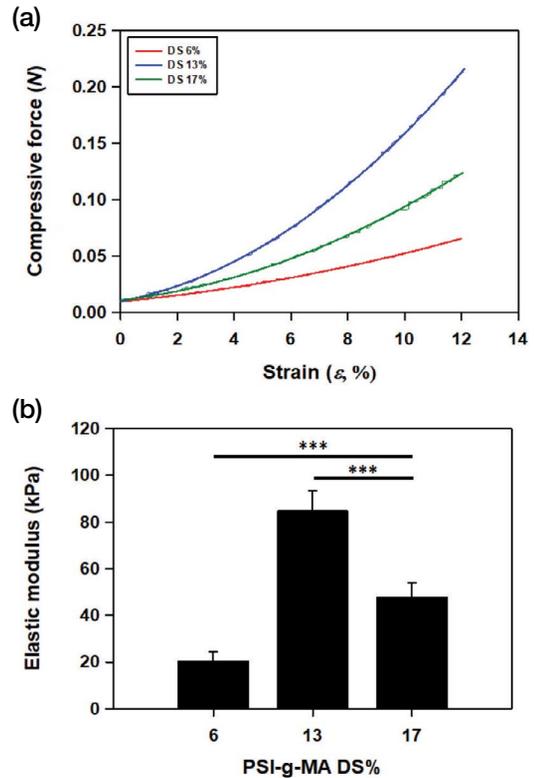


Fig. 4. (a) Compressive strain and stress curves of lipophilic gel; (b) elastic modulus (E) varying degree of substitution (DS) of PSI-g-MA (***, $p < 0.001$).

고정하였고 이에 따라 PSI-g-MA의 접목도가 증가할수록 소수성 겔 제조에서 PSI backbone의 함량 비중은 줄어들게 된다. 그 결과, 제조된 소수성 겔의 강도는 접목도의 증가에 따른 일반적인 기계적 강도의 증가와 다른 양상을 그림 4를 통해 확인하였다. 그림 4(a)는 만능재료시험기로 소수성 겔의 압축 강도를 시험범위 12%까지 0.2 mm/min의 속도로 하중을 가하여 측정된 응력-변형 곡선(S-S curve) 그래프이다. 기계적 강도의 값을 계산하기 위해 시험범위 내 2~8%의 값을 취하였으며 이는 그림 4(b)의 영 탄성률 값으로 도시하였다. 접목도 6%에서 13%까지는 접목도가 증가함에 따라 소수성 겔의 기계적 강도가 20.3 kPa에서 84.7 kPa까지 증가하는 경향을 보였으나, 13%에서 17%까지는 접목도가 증가하여도 기계적

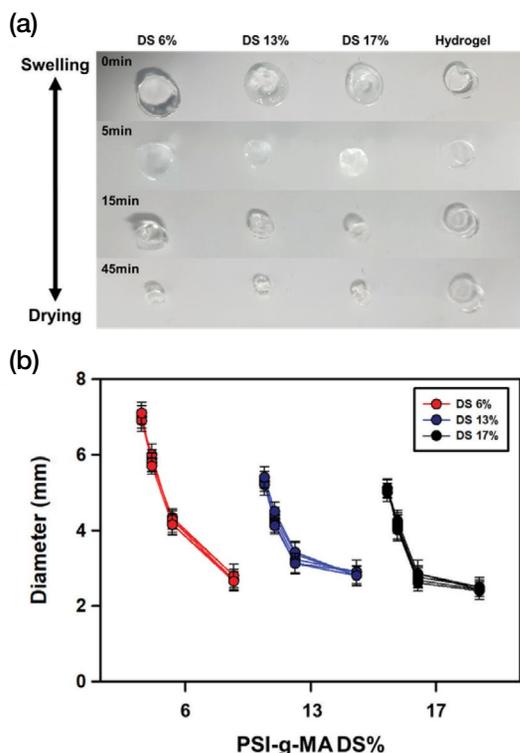


Fig. 5. (a) Swelling-drying recycling images of lipophilic gel varying degree of substitution (DS) of PSI-g-MA; (b) Swelling-drying hysteresis curve.

강도는 반대로 84.7 kPa에서 47.5 kPa까지 감소하는 경향을 나타냈다.

상온 대기 상에서 VOCs 흡수용 소수성 겔의 팽윤 및 수축 과정을 그림 5(a)에 도시하였다. VOCs 용액으로 DMSO를 사용하였고 완전 팽윤된 소수성 겔을 상온 대기 상에서 건조시켰다. 비교군으로 증류수에서 완전 팽윤된 하이드로젤을 사용하였으며 소수성 겔과 동일한 환경에서 진행되었다. 건조되는 시간마다 겔의 직경을 측정하여 겔의 팽윤 및 수축 정도를 확인하였다(그림 5(b)). 본 연구에서 제조된 VOCs 흡수용 소수성 겔은 VOCs 용액 상에서 완전 팽윤 후 대기 상에서 45분 동안 완전 건조 되었으며, 이후 추가적인 팽윤 및 건조 과정을 통해 VOCs 흡수용 소수성 겔의 재사용 가능성을 확인하였다.

3.3 VOCs 흡수용 가지형 가교제

VOCs 흡수용 소수성 겔을 제조하기 위해 소수성 전구체인 PSI를 합성하고 아크릴기를 도입하여 PSI-g-MA 가지형 가교제를 소수성 겔에 가교제로 사용하였다. 그 결과 VOCs 흡수능은 유지하면서 기계적 강도를 증가시킬 수 있었다. 본 연구의 가지형 가교제는 아크릴기가 도입되지 않은 PSI backbone에 추가적인 도입이 가능하며, 향후 이에 대한 후속 연구를 수행하면서 VOCs 흡수용 소수성 겔의 흡수능을 증가시킬 수 있으리라 기대된다. 또한, 다양한 실리콘 단량체를 소수성 겔에 도입함으로써 VOCs 종류와 환경에 따른 VOCs 흡수용 소수성 겔을 최적화하고자 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 소수성 전구체인 PSI를 합성하고 아크릴기를 도입하여 다양한 접목도를 갖는 가지형 가교제 PSI-g-MA를 합성하였다. PSI-g-MA는 ¹H-NMR 분석 결과 접목도 6%, 13%, 17%로 아크릴기가 도입되었고 실리콘 단량체인 MPTS와 함께 DMSO 상에서 혼합되어 VOCs 흡수용 소수성 겔로 제조되었다. 제조된 VOCs 흡수용 소수성 겔은 PSI backbone에 아크릴기의 접목도에 따라 VOCs 용액의 흡수 능력은 유지하면서 기계적 강도는 증가시키는 독립제어(independent control)가 가능했다. 본 연구에서 접목도 13%의 PSI-g-MA로 제조된 소수성 겔은 기계적 강도가 다른 소수성 겔에 비해 가장 높으면서 팽윤비는 큰 차이가 없음을 확인하였다. 이를 통하여 기존의 3차원 고분자 겔의 흡수능의 증가와 기계적 내구성의 상관관계에서 발생하는 문제점을 가지형 가교제 PSI-g-MA의 도입 및 물성의 독립제어로 극복할 수 있음을 확인하였다. 또한, VOCs 맞춤형으로 소수성 겔을 제조할 수 있을 뿐만 아니라, 이는 VOCs 흡수용 소수성 겔로써 고농도 VOCs 전처리 맵핑장치, 폐수정화 시스템, 대기공학 및 환경공학의 다양한 분야에 활용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 기후변화대응기술개발사업(2017M1A2A2086515)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- Baek, K., Jeong, J.H., Shkumatov, A., Bashir, R., Kong, H. (2013) In situ self-folding assembly of a multi-walled hydrogel tube for uniaxial sustained molecular release, *Advanced Materials*, 25(39), 5568-5573.
- Cha, C., Kohman, R.H., Kong, H. (2009) Biodegradable polymer crosslinker: independent control of stiffness, toughness, and hydrogel degradation rate, *Advanced Functional Materials*, 19(19), 3056-3062.
- Cha, C.N., Jeong, J.H., Tang, X., Andrew, T.Z., Prakash, Y.S., Steven, C.Z., Taher, A.S., Kong, H.J. (2011) Top-down synthesis of versatile polyaspartamide linkers for single step protein conjugation to materials, *Bioconjugate Chemistry*, 22(12), 2377-2382.
- Chae, J.S., Jang, M.K., Kim, S.T., Choi, J.W., Kim, K.H., Hong, S.Y., Lee, J.J., Kim, J.H., Jeon, J.M. (2017) The evaluation of homogeneity and stability of proficiency testing materials in indoor air quality test, *Journal of Odor Indoor Environment*, 16(4), 401-409. (in Korean with English abstract)
- Chan, V., Zorlutuna, P., Jeong, J.H., Kong, H., Bashir, R. (2010) Three-dimensional photopatterning of hydrogels using stereolithography for long-term cell encapsulation, *Lab on a Chip*, 10(16), 2062-2070.
- Cho, S.W., Shin, S.G., Kim, H.J., Han, S.R., Jeong, J.H. (2017) Self-folding of Multi-layered Hydrogel Designed for Biological Machine, *Polymer (Korea)*, 40(2), 1-6. (in Korean with English abstract)
- Darracq, G., Couvert, A., Couriol, C., Amrane, A., Thomas, D., Dumont, E., Andres, Y., Le Cloirec, P. (2010) Silicone oil: an effective absorbent for the removal of hydrophobic volatile organic compounds, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 85(3), 309-313.
- Darracq, G., Couvert, A., Couriol, C., Amrane, A., Le Cloirec, P. (2012) Removal of hydrophobic volatile organic compounds in an integrated process coupling absorption and biodegradation-selection of an organic liquid phase, *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(8), 4969-4997.
- Dumont, E., Darracq, G., Couvert, A., Couriol, C., Amrane, A., Thomas, D., Thomas, D., Le Cloirec, P. (2012) Hydrophobic VOC absorption in two-phase partitioning bioreactors; influence of silicone oil volume fraction on absorber diameter, *Chemical Engineering Science*, 71, 146-152.
- Fang, P., Tang, Z.J., Chen, X.B., Tang, Z.X., Chen, D.S., Huang, J.H., Zeng, W.H., Cen, C.P. (2016) Experimental Study on the Absorption of Toluene from Exhaust Gas by Paraffin/Surfactant/Water Emulsion, *Journal of Chemistry*, 2016, 1-9.
- Guenther, A., Hewitt, C.N., Erickson, D., Fall, R., Geron, C., Graedel, T., Harley, P., Klinger, L., Lerdau, M., McKay, W.A., Pierce, T., Scholes, B., Steinbrecher, R., Tallamraju, R., Taylor, J., Zimmerman, P. (1995) A global model of natural volatile organic compound emissions, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D5), 8873-8892.
- Jeong, J.H., Cha, C.N., Amy, K., John, H., Oh, S.N., Kong, H.J. (2012) Polyaspartamide vesicle induced by metallic nanoparticles, *Soft Matter*, 8, 2237-2242.
- Jung, M.H., Shin, S.G., Lim, J.W., Han, S.R., Kim, H.J., Jeong, J.H. (2018) Tuning the Stiffness of Dermal Fibroblast-Encapsulating Collagen Gel by Sequential Cross-linking, *Journal of the Society of Cosmetic Scientists of Korea*, 44(1), 23-29. (in Korean with English abstract)
- Kang, I.S., Xi, J., Hu, H.Y. (2017) Effects of different operating conditions on the VOCs removal performance of UV irradiation reactors, *Journal of Odor Indoor Environment*, 16(1), 72-80. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.J., Cho, Y.N., Cho, S.W., Kim, Y.K., Ryu, H.W., Jeong, J.H. (2016) Tuning the hydrophobicity of agar hydrogel with substituent effect, *Polymer(Korea)*, 40(2), 321-327. (in Korean with English abstract)
- Montes, M., Daugulis, A.J., Veiga, M.C., Kennes, C. (2011) Characterization of absorbent polymers for the removal of volatile hydrophobic pollutants from air, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 86(1), 47-53.
- Muzenda, E. (2013) A critical discussion of volatile organic compounds recovery techniques, *International Journal of Biological, Ecological and Environmental Sciences*, 2(4), 73-78.
- Ono, T., Sugimoto, T., Shinkai, S., Sada, K. (2007) Lipophilic polyelectrolyte gels as super-absorbent polymers for nonpolar organic solvents, *Nature Materials*, 6(6),

- 429-433.
- Padhi, S.K., Gokhale, S. (2014) Biological oxidation of gaseous VOCs-rotating biological contactor a promising and eco-friendly technique, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(4), 2085-2102.
- Park, M.J., Jo, Y.M. (2014) Decomposition of odorous VOCs ion-plasma process, *Journal of Odor Indoor Environment*, 13(4), 251-255. (in Korean with English abstract)
- Shen, X., Zhao, Y., Chen, Z., Huang, D. (2013) Heterogeneous reactions of volatile organic compounds in the atmosphere, *Atmospheric Environment*, 68, 297-314.
- Yang, C., Qian, H., Li, X., Cheng Y., He, H., Zeng, G., Xi, Y. (2018) Simultaneous removal of multicomponent VOCs in biofilters, *Trends in Biotechnology*, 36(7), 673-685.
- Yun, B.R., Kim, T.O. (2017) A study of BTEX removal using SiC, *Journal of Odor Indoor Environment*, 16(2), 121-128.
- Zhang, X., Gao, B., Creamer, A.E., Cao, C., Li, Y. (2017) Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: A review, *Journal of Hazardous Materials*, 338, 102-123.

Authors Information

- 정재현(송실대학교 화학공학과 교수)
신성규(송실대학교 화학공학과 대학원생 연구원)
정나슬(송실대학교 화학공학과 대학원생 연구원)
김희진(송실대학교 화학공학과 대학원생 연구원)