

전기-기계적으로 내구성이 있는 rGO-SEBS 복합 탄성체의 제조와 스트레인 센서로의 응용

박대동 · 임진형[†]

공주대학교 공과대학 신소재공학부

(2021년 9월 10일 접수, 2021년 11월 2일 수정, 2021년 11월 3일 채택)

Preparation of the Electro-Mechanically Durable rGO-SEBS Composite Elastomer and Its Application as a Strain Sensor

Dae-Dong Park and Jin-Heong Yim[†]

Division of Advanced Materials Engineering, Kongju National University, 1223-24 Cheoandaero, Cheonan, Chungnam 31080, Korea

(Received September 10, 2021; Revised November 2, 2021; Accepted November 3, 2021)

초록: 전기 전도성 강화 재료인 reduced graphene oxide(rGO)를 polystyrene-ethylene-butadiene-styrene(SEBS)에 3, 5 및 7 wt%의 다양한 로딩 농도로 분산시켜 rGO-SEBS 엘라스토머 복합체를 제조하고 스트레인 센서로의 응용을 위해 다양한 특성 분석을 하였다. rGO의 함량이 증가할수록 전기 전도도는 증가하지만 폴리머 매트릭스에서는 rGO가 기계적 물성 강화 필러로 작용하여 신율이 저하되었다. 5 wt% 이상 rGO 첨가는 엘라스토머 복합체의 탄성적 특성 저하를 야기하여 이를 보완하기 위해 rGO 3 wt% 복합체에 적당량의 polyethylene glycol(PEG)를 첨가하여 rGO와 수소결합을 통해 그래핀의 분산성을 향상시키고 전기 전도 경로를 향상시켜 주었다. PEG의 첨가는 신율 감소의 최소화, 열적 안정성의 증대와 함께 전기 전도성 재료의 추가없이 높은 전기 전도도의 향상을 보여주었고, 균일하고 높은 상대 전기저항 변화(스트레인 센서 감도 증가)와 재현성 및 내구성을 가지는 스트레인 센서로의 응용 가능성을 보여 주었기에 음성, 심박수, 측정과 같은 휴머노이드 인터페이스와 같은 다양한 센서 응용 분야에 적용될 수 있다고 판단된다.

Abstract: rGO-SEBS elastomer composites were prepared by dispersing reduced graphene oxide (rGO), an electrically conductive reinforcing material, in the polystyrene-ethylene-butadiene-styrene (SEBS) matrix with various loading concentrations of 3, 5, and 7 wt%. The elastomer composites were characterized for investigating their application as a strain sensors in terms of morphological, electro-mechanical properties. As the content of rGO increased, the electrical conductivity increased, while the elongation was lowered by rGO content due to its mechanical property-reinforcing characteristics. The addition of 5 wt% or more of rGO causes deterioration of the elastic properties of the elastomer composite. To compensate for this, an appropriate amount of polyethylene glycol (PEG) is added to the 3 wt% rGO composite to improve the dispersibility of rGO through hydrogen bonding as well as enhanced electrical conduction pathways. The addition of PEG achieved high electrical conductivity without the addition of an additional electrically-conductive material along with the minimization of elongation reduction and increased thermal stability. Moreover, the composite showed improved sensitivity (gauge factor), reproducibility, and durability as a strain sensor. PEG added rGO-SEBS elastomer composites are considered to apply to various sensor applications such as humanoid interfaces such as voice, heart rate measurement.

Keywords: reduced graphene, polystyrene-ethylene-butadiene-styrene, polyethylene glycol, hydrogen bond, strain sensor.

서 론

건강한 라이프 스타일을 지향하는 현대인들의 웨어러블 기

기들이 폭발적으로 증가함에 따라, 기계적 변형을 전기저항, 정전용량, 전하량, 광신호 등의 다른 매개변수로 변환하여 쉽고 직접적으로 빠르게 측정할 수 있는 디바이스인 스트레인 센서에 대한 수요가 증가하고 있다. 금속, 합금, 반도체 소재 기반으로 알려진 기존의 스트레인 센서는 매우 높은 감도를 가지고 있음에도 불구하고 낮은 유연성과 스트레인 범위를

[†]To whom correspondence should be addressed.
jhyim@kongju.ac.kr, ORCID[®] 0000-0002-3557-9564
©2022 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

가지고 있어,^{1,3} 유연하고 신축성이 요구되는 센서로는 한계를 가진다. 전도성 고분자 복합 재료(*conductive polymer composite*, CPC)는 스트레인 센서^{4,5}를 포함한 다양한 전자 장치^{6,7}에 적용될 때 우수한 전기-기계적 특성으로 인해 많은 주목을 받고 있다. 이러한 CPC에는 탄소 기반 재료(흑연, 카본블랙,^{8,9} 탄소 나노튜브,^{10,11} 그래핀,¹²⁻¹⁵ 금속 나노와이어^{16,17} 및 전도성 고분자¹⁸ 포함된다. 전기적 신호를 전달하는 활성 전도성 나노 충전제의 구성 요소로서의 그래핀은 고분자 매트릭스에 효과적으로 분산되어 나노 복합체로 구성할 수 있다. 특히 스트레인 감지 분야에서 다양한 그래핀 기반 CPC에 대한 다양한 연구가 증가하고 있다.^{12,14,15} 고성능의 유연한 플렉서블 스트레인 센서를 만드는 직물 복합체는¹⁹ 유연하고 민감할 뿐만 아니라 높은 인장 강도를 보고한 바 있고, 변형 기반 감지 분야에서 다양한 그래핀 기반 복합 재료의 뛰어난 성능은 웨어러블 센서에서 건강 모니터링 시스템까지 다양한 응용 분야를 확장하고 있다.^{20,24}

그러나 그래핀과 고분자 매트릭스 사이의 상호작용력의 부족으로 인한 고분자 매트릭스에 그래핀의 균일한 분산은 항상 디바이스의 신뢰성에 제한을 주는 문제였다. 따라서 다양한 연구 그룹들은 그래핀 기반 활성소재의 효과적인 분산을 위한 다양한 접근법 연구하고 고분자 매트릭스에서의 불량한 분산과 약한 계면 결합력을 개선하기 위한 메커니즘을 검토하였다. Liang 등은 다양한 물리적 분산 방법, 공유 및 비공유 결합을 이용한 화학적 방법으로 고분자 매트릭스에서 그래핀의 분산성을 향상시키는 문헌들을 정리한 바 있다.²⁵ 화학적인 방법으로 공유결합법을 이용한 접근법은 화학 반응에 의해 다양한 활성기를 도입하는 것이고, 비공유 결합법은 수소결합이나 반데르 발스 상호작용과 같은 이차결합을 통해 그래핀을 효과적으로 분산시키는 것이다. 공유 결합 방법의 한 예는 그래핀 나노시트에 폴리에틸렌 글리콜(PEG)을 통합하는 것이다.²⁶ 충전제와 매트릭스 사이에 직접적인 화학적 결합이 없을 때 가장 강한 2차 결합형 상호작용인 수소 결합은 CPC의 특성에 상당한 영향을 미친다. 그래핀 옥사이드(*graphene oxide*, GO) 및 환원된 그래핀 옥사이드(*reduced GO*, rGO)의 표면 에는 에테르, 에폭사이드, 카복실 및 하이드록실 그룹이 많이 있어 폴리비닐 알코올,²⁷ 폴리메틸메타크릴레이트,²⁸ 열가소성 폴리우레탄²⁹ 같은 유기 고분자 매트릭스와 수소 결합 상호 작용을 형성하기 쉬워 많은 연구들이 이루어져왔다. 반면에 비극성 폴리올레핀이나 열가소성 엘라스토머(TPE)인 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 폴리스티렌, 스티렌 부타디엔 고무에 대한 그래핀 분산 연구는 상대적으로 많지 않았다. 특히, TPE 중에서 폴리스티렌-*b*-폴리(에틸렌-*r*-부틸렌)-*b*-폴리스티렌(SEBS)은 열가소성 수지의 전형적인 고무 특성과 가공성의 매력적인 균형을 나타낸다.^{30,31} ABA 블록 공중합체의 결과로 상분리된 SEBS는 고무 탄성을 보이면서 응용 압출에 의한 가공을 가능하게 하는 열가역적 물리적 가

교를 형성한다.³² 또한 SEBS는 높은 폴리올레핀 상용성과 및 낮은 팽창과 함께 우수한 내후성을 나타낸다.³³ 따라서 SEBS는 자동차 내장 부품, 의료 기기, 접착제, 실런트 또는 코팅의 연질 폴리염화비닐(PVC) 대체에 이르기까지 다양한 응용 분야의 매우 다양한 요구를 충족하며, 특히 CPC를 위한 고분자 매트릭스로의 큰 가능성을 가진다고 판단되었다.^{30,31,33}

본 연구에서는 습식 공정을 통해 폴리에틸렌글리콜을 첨가한 rGO가 내재된 SEBS 엘라스토머 복합체를 전기-기계적으로 견고한 전도성 복합체는 스트레인 센서 응용 분야에 적용하여 감도와 신뢰성을 향상시키고자 하였다. 다양한 전기-기계적 특성 분석을 통하여 제안된 rGO-SEBS기반 엘라스토머의 스트레인 센서로의 응용 가능성을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 다양한 하중 수준, 내구성 테스트로 스트레인 감지 기능을 조사했다. 제안된 복합체는 음성, 심박수, 습도, 체온, 혈압 등과 같은 휴머노이드 인터페이스와 같은 다양한 센서 응용 분야에 유용할 수 있다고 판단된다.

실 험

시약 및 재료. 센서 연결기관의 재료로써 polystyrene-ethylene-butadiene-styrene(SEBS, Kraton G1652, styrene ratio =30, specific gravity=0.91 g/mL, MI=5(230 °C, 5 kg)), 전기 전도성 필러로써 rGO(Grapheneall, carbon=92%, oxygen=8%, D/G ratio=0.99), 그래핀과 수소결합 상호작용을 통해 균일한 분산을 위한 첨가제로써 PEG(Aldrich, $M_w=1540$), 용매로 tetrahydrofuran(THF, Samchun chemical)을 추가 정제없이 사용하였다.

SEBS-rGO Composite Film 제조. THF에 SEBS를 10 wt%로 2시간 교반하여 용해시킨 후 rGO 3, 5, 7 wt%를 첨가하여 30분 간 교반, rGO의 균일한 분산을 위하여 2시간 동안 초음파 처리하였다. 그 후, 용액을 페트리디쉬에 붓고 상온 데시케이터 내에서 18시간, 25 °C 진공 오븐에서 4시간 건조하여 용매를 모두 제거하고 페트리디쉬에서 떼어내 길이 40 mm, 폭 10 mm로 잘리주었다. SEBS-rGO-PEG composite film은 상기와 같은 공정으로 THF에 SEBS를 10 wt%로 2시간 교반하여 용해시킨 후 PEG 1, 3, 5, 7 wt%, rGO를 3 wt% 첨가하는 단계가 추가되었다. 전도성 엘라스토머 복합체의 두께는 0.2 mm로 측정되었고 제조과정은 Figure 1에 자세히 나타내었다.

SEBS-rGO-PEG Composite Film 특성 분석. 물리적 특성 분석을 위하여 universal testing machine(UTM, Hounsfield, H10KS)을 이용해 10 mm/min의 변형 속도로 인장 실험을 진행하였다. 전기적 특성분석을 위하여 I-V 거동을 조사하였다. -20~20 V 범위에서 probe station(Agilent Technologies, E5270A, U.S.A)을 이용하여 금속 특성인 선형의 옴(Ω) 거동을 따는지 확인하였다. 열적 특성분석을 위하여 differential

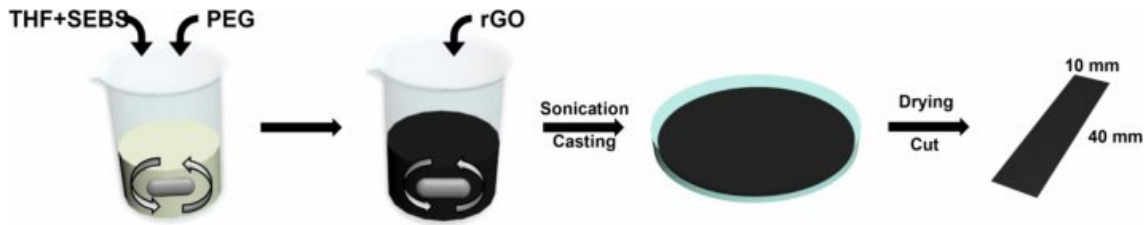


Figure 1. Fabrication scheme of SEBS composite films.

scanning calorimetry(DSC, TA instrument, Q20)를 이용해 $-70\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 범위에서 4-5 mg의 시료를 비어있는 기준 시료와 함께 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 승온시켜 열적 거동인 유리전이온도(glass transition temperature, T_g)와 용융온도(melting temperature, T_m)를 측정하였다. 전도성 엘라스토머 복합체를 Pt/Au 코팅하여 field emission scanning electron microscopy(FE-SEM, MIRA 2, TESCAN)를 이용해 10 kV 전압 하에서 다양한 배율로 관찰하여 SEBS-rGO 기반 composite films 표면의 형태학적 특성을 측정하였다. 필름의 인장 수축 반복실험을 통한 상대 전기저항 변화를 측정하기 위하여 자체 제작한 multi-purpose flexibility test machine(IPEN Co., Korea)으로 필름에 0.08 Hz의 속도로 다양한 스트레인 레벨의 인장 수축 반복 변화를 주고 inductance/capacitance/resistance(LCR) meter

(GW Instek, LCR-6100)로 직류 전압(DCR) 하에서 전기저항 변화 측정을 하였다.

결과 및 토론

SEBS-rGO 전도성 엘라스토머 복합체의 기계적/전기적/열적 특성 분석. Figure 2와 Table 1에 다른 양의 rGO와 PEG를 포함하는 SEBS-rGO 복합체의 기계적-전기적 특성을 나타내었다. Figure 2(a)는 rGO의 함량이 늘어날수록 기계적 물성이 떨어지는 것을 볼 수 있는데 이는, SEBS 고분자 사슬들 사이에 매우 stiff한 특성을 지니는 rGO가 균일하게 분산되면서 고분자 매트릭스에는 기계적 강화제로 작용하여 Young's modulus가 증가하며 신율이 감소하였다. 예상했던

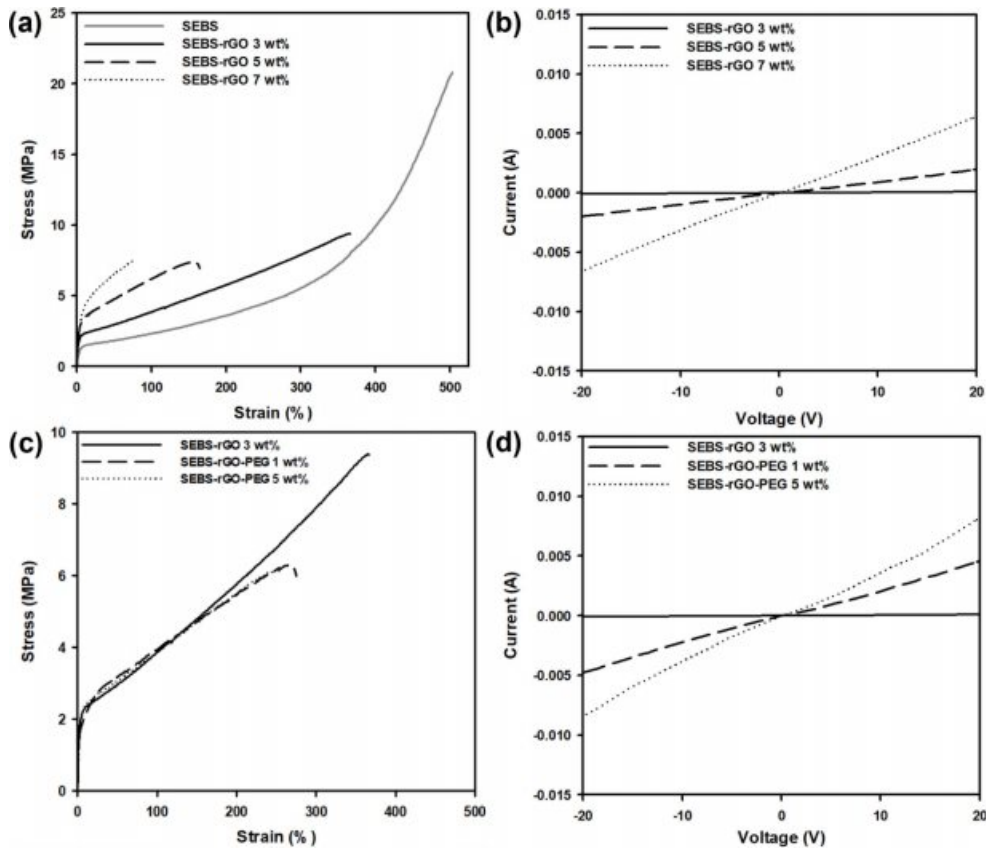


Figure 2. Mechanical-electrical curve of SEBS based strain sensor: different rGO concentrations: (a) strain-stress curve; (b) I-V curve; different PEG concentrations (c) strain-stress curve; (d) I-V curve.

Table 1. Mechanical-electrical Properties of SEBS Based Strain Sensor at Different rGO, PEG Concentrations

	Strain (%)	Stress (Mpa)	Young's modulus (MPa)	Conductivity (S/cm)
SEBS	503.3	20.8	0.11	-
SEBS-rGO 3 wt%	366.7	9.4	0.14	0.1
SEBS-rGO 5 wt%	164.7	7.4	0.25	2.0
SEBS-rGO 7 wt%	78.3	7.5	0.36	6.6
SEBS-rGO-PEG (1 wt%)	274.8	6.0	0.13	4.7
SEBS-rGO-PEG (3 wt%)	446.4	8.7	0.12	6.2
SEBS-rGO-PEG (5 wt%)	257.7	6.1	0.17	7.6
SEBS-rGO-PEG (7 wt%)	392.8	8.5	0.20	7.7

데로 Figure 2(b)는 rGO의 함량이 늘어날수록 선형의 금속음(Ω) 거동을 띠며 전기 전도도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 5 wt% 이상 rGO의 첨가는 rGO 3 wt% 복합체에 비해 신율이 절반 이하 수준으로 떨어지는 탄성 특성을 띠어 높은 전기 전도도를 가짐에도 엘라스토머 복합체로서의 특성에 불리하기 때문에 이를 보완하기 위해 3 wt% rGO 함량을 기반으로 PEG를 첨가하였다. PEG 함량이 증가함에 따라 rGO 3 wt% 복합체에 비해 75% 가량 신율은 감소하였지만 전기 전도도가 월등히 높아지는 결과를 보여주었다(Figure 2(c), (d)). 이는 rGO의 작용기와 PEG가 수소 결합하여 균일한 그래핀 분산을 유도하고, PEG 사슬은 rGO가 전기 전도 경로를 따라 정렬되어 전기적 특성이 향상된 것이라 추정된다.^{34,35} 5 wt% 이상 rGO 복합체의 기계적 물성과 비교하였을 때 PEG 첨가 시 탄성 특성(신율)이 월등히 높고 전기 전도도 또한 우수한 것을 볼 수 있다(Table 1).

Figure 3에 SEBS-rGO 복합체의 DCS 곡선을 나타내었다. 얻어진 열곡선에서 SEBS, SEBS-rGO, SEBS-rGO-PEG 복합체의 T_g 가 각각 $-57.48/-55.31/-54.88/-53.95/-52.97/-52.70$ °C,

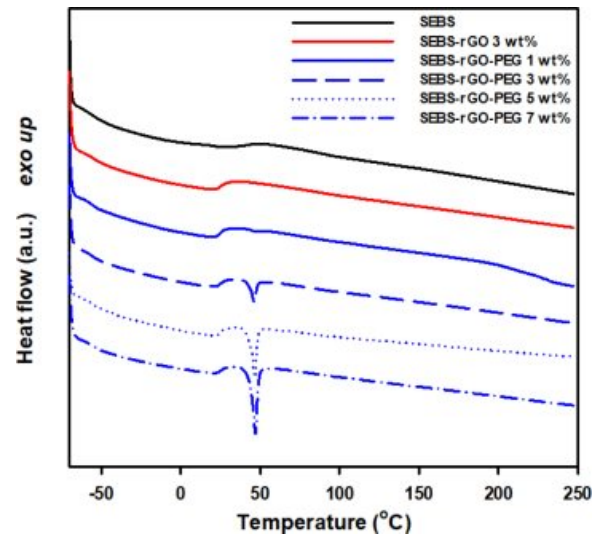


Figure 3. DSC thermograms of SEBS-rGO-PEG (M_w 1540) composite films.

SEBS-rGO-PEG 복합체의 경우 PEG의 T_m 이 각각 46.41/46.65/46.84/46.93 °C로 점차 증가하는 것이 관찰되었다. 고분자 화합물의 열적 특성은 복합체 내 화학구조에 의존하므로 rGO와 PEG의 함량이 증가할수록 SEBS 고분자 사슬과 rGO, PEG가 수소결합 및 분자 간 상호작용을 통해 서로 밀접하게 되어 T_g 와 T_m 이 증가한 것으로 판단된다.

SEBS-rGO 전도성 엘라스토머 복합체의 형태학적 분석. Figure 4에서 SEBS-rGO 전도성 엘라스토머 복합체 매트릭스 내 rGO와 PEG가 균일하게 분산된 표면 형태를 관찰, 비교하였다. SEBS는 깨끗하고 매끈하지만 경질 및 연질 세그먼트가 응집되어 있는 표면이 관찰되었고(Figure 4(a)), rGO의 함량이 증가할수록 SEBS 매트릭스에 rGO가 응집된 입자와 그 크기가 증가하는 것이 관찰되었다(Figure 4(b-d)). 이는, 고분자 매트릭스에 초음파 처리를 통한 rGO의 분산이 성공적으로 이루어졌고 rGO의 함량이 증가할수록 전기 전도 경

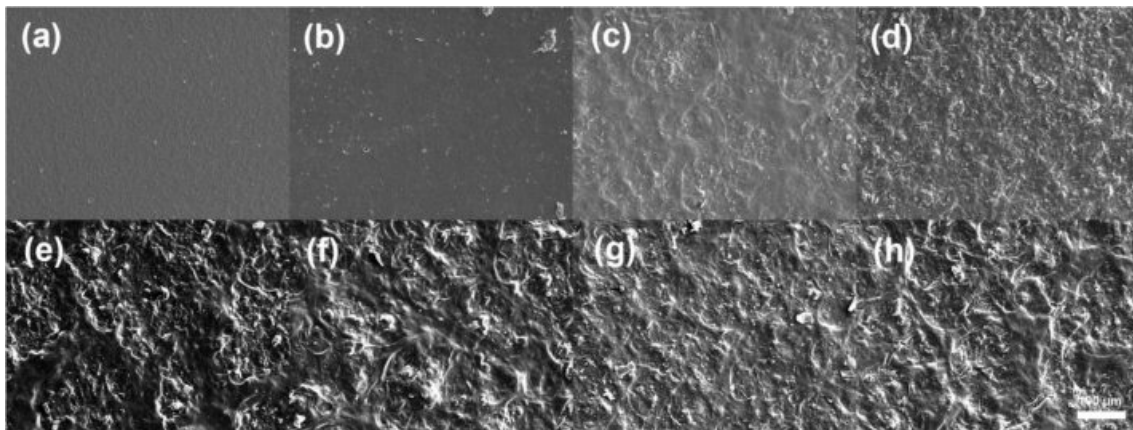


Figure 4. FE-SEM surface images of the SEBS based composite film ($\times 500$ magnification): (a) SEBS; with rGO; (b) 3 wt%; (c) 5 wt%; (d) 7 wt; SEBS-rGO 3 wt% based PEG addition sample molecular weight 1540 (e) 1 wt%; (f) 3 wt%; (g) 5 wt%; (h) 7 wt%.

로의 확대를 나타낸다. SEBS-rGO 3 wt% 복합체에 PEG가 첨가되고 그 함량이 증가할수록 rGO와 수소 결합할 수 있는 PEG 고분자 사슬의 수가 늘어나 표면에 PEG 고분자 사슬을 따라 균일하게 수소결합되어 거대하게 응집된 입자와 그 입자들의 수가 늘어나는 것을 관찰할 수 있다(Figure 4(e-h)).

상기에 기술된 기계적-전기적 특성분석에서 rGO 함량이 증가할수록 신율의 저하와 전기 전도도가 향상된 것과 SEBS-rGO 3 wt% 복합체에 PEG 첨가 시 저하된 탄성 특성이 보완되고 전기 전기전도도가 향상되는 것이 rGO 입자들이 PEG에 수소 결합되며 정렬된 rGO의 입자들이 전기 전도 경로를 넓히며 전기 전도도를 향상시키지만 탄성적 물성(신율)을 방해하는 요소로 작용함을 FE-SEM을 이용한 형태학적 분석을 통해 확인할 수 있었다.

SEBS-rGO 전도성 엘라스토머 복합체 기반 스트레인 센서 거동 분석. Figure 5, Figure 6은 SEBS-rGO 전도성 엘라스토머 복합체에 신체의 손이나 피부의 최대 움직임 범위인 5%부터^{36,37} 더욱 넓은 감지 범위탐지를 위한 높은 스트레인 범위(5-100%)까지 반복적인 신장-수축 변화를 주어 복합체의 상대 전기저항 변화를 나타내었고 이를, 변형률(ϵ)로 나누어 ($\Delta R/R_0$)/ ϵ 로 정의되는 gauge factor(GF)로 전도성 엘라스토머 복합체 기반 스트레인 센서의 감도를 평가하였다. SEBS-rGO 복합체는 rGO 함량이 늘어날수록 상대 전기저항 변화가 줄어들는데(Figure 5(a), (b)), 이는 적은 rGO 함량에서 복합체 내부에 전기 전도경로가 불안정하고 전기 전도도가 낮

기 때문에(Figure 2(b)) 높은 상대 전기저항 변화와 GF. 값을 보인다. 특히, 높은 스트레인 레벨에서 더욱 큰 상대 전기저항 변화를 보이는데(Figure 5(b)) rGO 함량이 적을 경우 높은 스트레인 레벨에서 신장될 때 rGO 사이 거리가 멀어지며 전기 전도 경로가 불안정해지는 정도가 커 높은 수준의 GF. 값을 보여주어 스트레인 센서로써 감도가 우수한 것을 보여주었다. rGO 3 wt% 기반 복합체의 스트레인 거동(Figure 5(c))이 50%의 신장-수축에서는 GF. 값이 비슷하지만 100% 신장-수축에서는 비슷하지 않아 피크 높이의 변동이 있었다. 이는 전기적 특성 분석(Figure 2(b))에서 보여준 낮은 전기 전도성에 기인한 것이라 판단되어 하중 변화에 따른 스트레인 센서 거동(Figure 5(c))을 보완하기 위해 PEG를 첨가하였다(Figure 5(d-f)). PEG 1 wt% 복합체의 5%의 스트레인 하중을 준 상태에서 rGO 3 wt% 복합체에 비해 2.6배, 100% 스트레인 하중 레벨(GF.=26.8)보다 높은 GF. 값(32.5)을 보여주었고, 히스테리시스 거동에선 인장 시에만 변형률이 크며 300%까지의 스트레인 하중을 주었을 때 낮은 스트레인 하중에선 안정적인 상대저항변화를 보이는데, 이는 스트레인 센서로써 우수한 감도 특성의 향상 및 넓은 범위의 감도 특성을 의미한다. PEG 5 wt% 복합체는 높은 전기 전도도와 복합체 내 충분한 전기 전도경로의 형성으로 인해 낮은 상대 전기저항 변화와 GF. 값을 나타내는 것으로 유추된다. Figure 6에서 9000회의 신장-수축 변화를 통해 SEBS-rGO 복합체와 SEBS-rGO-PEG 복합체 간 상대 전기저항 변화의 재현성과

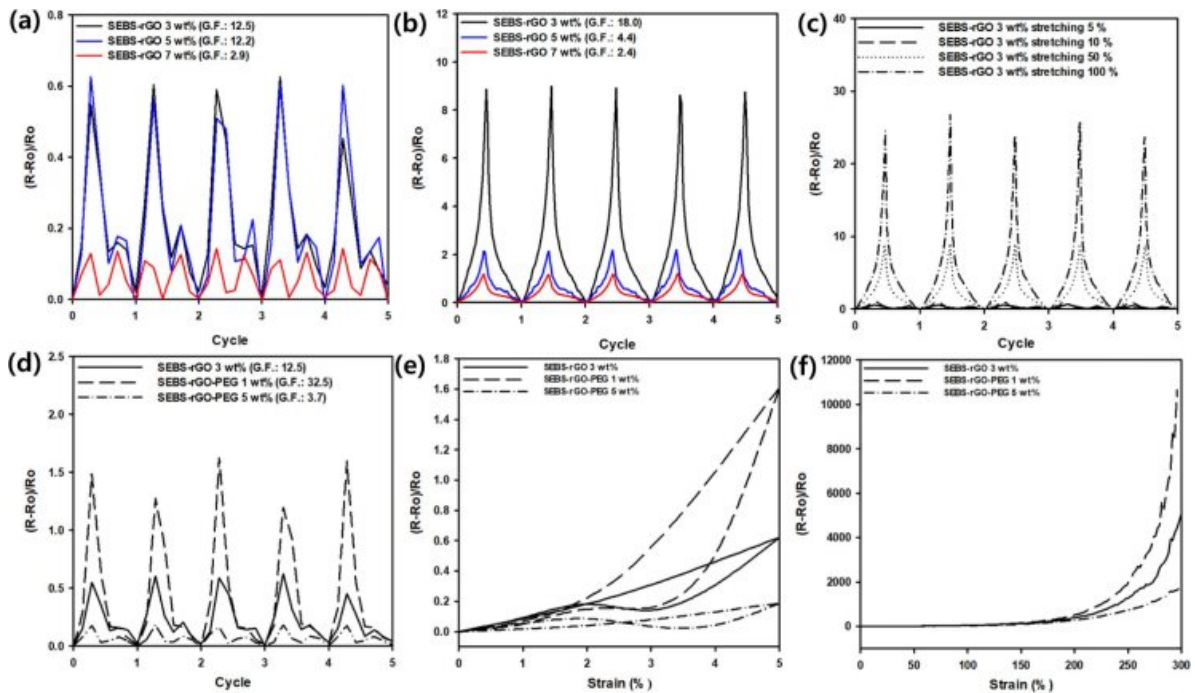


Figure 5. Electrical relative resistance change performance of SEBS composite films: (a) 5% stretching test of SEBS-rGO; (b) 50% stretching test of SEBS-rGO; (c) different stretching level test of SEBS-rGO; (d) 5% stretching test of SEBS-rGO composites; (e) mechanical hysteresis of SEBS-rGO-PEG composites; (f) strain-(R-R₀)/R₀ curve of SEBS-rGO-PEG composites at stretching rate of 0.08 Hz.

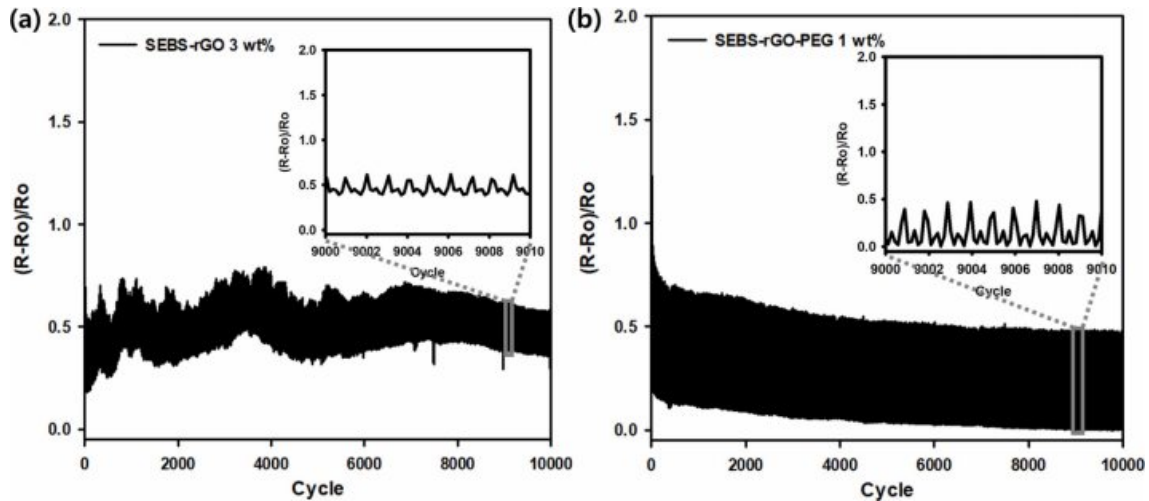


Figure 6. Relative resistance change of SEBS-rGO based composite as a function of stretching and releasing 10000 cycles at 5% change in length: (a) SEBS-rGO 3 wt%; (b) SEBS-rGO PEG 1 wt%.

내구성을 비교하여 나타내었다. SEBS-rGO 복합체는 전체적인 GF값은 비슷하지만 6000회의 신장-수축 반복까지 불안정한 형태의 상대 전기저항변화를 보여주는데 복합체 내 불안정하던 전기 전도경로가 반복되는 신장수축으로 인해 전기 전도경로가 정렬되어 그 이후 안정적인 상대 전기저항 변화를 보여준다. SEBS-rGO-PEG 복합체의 경우 9000회의 신장-수축 반복동안 일정한 GF 값과 상대 전기저항변화를 보여주고 PEG의 첨가로 PEG 고분자 사슬과 rGO가 수소결합하여 안정된 전기 전도 경로를 가지게 되며 SEBS-rGO 복합체보다 높은 안정성이 있음을 보여준다. 또한 Figure 6(b)에서 두 가지 복합체 모두 초반 상대 전기저항 변화와 후반 상대 전기저항 변화가 매우 일정함을 보여 우수한 재현성 및 내구성을 가지는 스트레인 센서로써 역할을 충분히 수행함을 보여주고 있다.

결 론

rGO를 첨가한 SEBS 폴리머 매트릭스에 PEG를 첨가하여 전기-기계적으로 견고한 전도성 엘라스토머 복합체를 제조하여 기계적, 전기적, 열적, 형태학적, 스트레인 센서 응용분야에 대한 특성 분석을 하였다. rGO의 함량이 증가할수록 전기 전도도가 증가하지만 폴리머 매트릭스에서는 기계적 물성 강화 필러로 신율이 저하되었다. 5 wt% 이상 rGO 첨가는 엘라스토머 복합체의 탄성적 특성이 크게 저하하여 이를 보완하기 위해 rGO 3 wt% 복합체에 적당량의 PEG를 첨가하여 rGO와 수소결합을 통해 그래핀의 분산성을 향상시키고 전기 전도 경로를 향상시켜 주었다. PEG의 첨가는 신율 감소의 최소화, 열적 안정성의 증대와 함께 전기 전도성 재료의 추가 없이 높은 전기 전도도의 향상을 이루었고, 균일하고 높은 상대 전기저항 변화(스트레인 센서 감도 증가)와 재현성 및 내

구성을 가지는 스트레인 센서로의 응용 가능성을 구현할 수 있었다.

감사의 글: 이 논문은 2021년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- Hong, S. K.; Yang, S.; Cho, S. J.; Jeon, H.; Lim, G. Development of a Waterproof Crack-Based Stretchable Strain Sensor Based on PDMS Shielding. *Sensors* **2018**, *18*, 1171.
- Xian, H. J.; Cao, C. R.; Shi, J. A.; Zhu, X. S.; Hu, Y. C.; Huang, Y. F.; Meng, S.; Gu, L.; Liu, Y. H.; Bai, H. Y.; Wang, W. H. Flexible Strain Sensors with High Performance Based on Metallic Glass Thin Film. *Appl. Phys. Lett.* **2017**, *111*, 121906.
- Liao, X.; Yan, X.; Lin, P.; Lu, S.; Tian, Y.; Zhang, Y. Enhanced Performance of ZnO Piezotronic Pressure Sensor Through Electron-Tunneling Modulation of MgO Nanolayer. *ACS Appl. Mater. Inter.* **2015**, *7*, 1602-1607.
- Jian, M.; Wang, C.; Wang, Q.; Wang, H.; Xia, K.; Yin, Z.; Zhang, M.; Liang, X.; Zhang, Y. Advanced Carbon Materials for Flexible and Wearable Sensor. *Sci. Chin. Mater.* **2017**, *60*, 1026-1062.
- Ponnamma, D.; Guo, Q.; Krupa, I.; Al-Maadeed, M. A. S. A.; Varughese, K. T.; Thomas, S.; Sadasivuni, K. K. Graphene and Graphitic Derivative Filled Polymer Composites as Potential Sensors. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2015**, *17*, 3954-3981.
- Chabot, V.; Higgins, D.; Yu, A.; Xiao, X.; Chen, Z.; Zhang, J. A Review of Graphene and Graphene Oxide Sponge: Material Synthesis and Applications to Energy and the Environment. *Ener. Envir. Sci.* **2014**, *7*, 1564-1596.
- Naveen, M. H.; Gurudatt, N. G.; Shim, Y. B. Applications of Conducting Polymer Composites to Electrochemical Sensor: A Review. *Appl. Mater. Today* **2017**, *9*, 419-433.
- Cochrane, C.; Koncar, V.; Lewandowski, M.; Dufour, C. Design and Development of a Flexible Strain Sensor for Textile Structures Based on a Conductive Polymer Composite. *Sensors*

- 2007, 7, 473-492.
9. Mattmann, C.; Clemens, F.; Tröster, G. Sensor for Measuring Strain in Textile. *Sensors* **2008**, 8, 3719-3732.
 10. Amjadi, M.; Yoon, Y. J.; Park, I. Ultra-Stretchable and Skin-Mountable Strain Sensors Using Carbon Nanotubes-Ecoflex Nanocomposites. *Nanotechnology* **2015**, 26, 375501.
 11. Yamada, T.; Hayamizu, Y.; Yamamoto, Y.; Yomogida, Y.; Izadi-Najafabadi, A.; Futaba, D. N.; Hata, K. A Stretchable Carbon Nanotube Strain Sensor for Human-Motion Detection. *Nat. Nanotechnol.* **2011**, 6, 296-301.
 12. Jang, H.; Park, Y. J.; Chen, X.; Das, T.; Kim, M. S.; Ahn, J. H. Graphene-Based Flexible and Stretchable Electronics. *Advan. Mater.* **2016**, 28, 4184-4202.
 13. Choi, Y. I.; Hwang, B. U.; Meeseepong, M.; Hanif, A.; Ramasundaram, S.; Trung, T. Q.; Lee, N. E. Stretchable and Transparent Nanofiber-Networked Electrodes Based on Nanocomposites of Polyurethane/Reduced Graphene Oxide/Silver Nanoparticles with High Dispersion and Fused Junctions. *Nanoscale* **2019**, 11, 3916-3924.
 14. Tang, Y.; Zhao, Z.; Hu, H.; Liu, Y.; Wang, X.; Zhou, S.; Qiu, J. Highly Stretchable and Ultrasensitive Strain Sensor Based on Reduced Graphene Oxide Microtubes-Elastomer Composite. *ACS Appl. Mater. Inter.* **2015**, 7, 27432-27439.
 15. Song, J.; Tan, Y.; Chu, Z.; Xiao, M.; Li, G.; Jiang, Z.; Wang, J.; Hu, T. Hierarchical Reduced Graphene Oxide Ridges for Stretchable, Wearable, and Washable Strain Sensors. *ACS Appl. Mater. Inter.* **2019**, 11, 1283-1293.
 16. Amjadi, M.; Pichitpajongkit, A.; Lee, S.; Ryu, S.; Park, I. Highly Stretchable and Sensitive Strain Sensor Based on Silver Nanowire-Elastomer Nanocomposite. *ACS Nano* **2014**, 8, 5154-5163.
 17. Yao, S.; Zhu, Y. Wearable Multifunctional Sensors Using Printed Stretchable Conductor Made of Silver Nanowires. *Nanoscale* **2014**, 6, 2345-2352.
 18. Losaria, P. M.; Yim, J. H. A Highly Stretchable Large Strain Sensor Based on PEDOT-Thermoplastic Polyurethane Hybrid Prepared via in situ Vapor Phase Polymerization. *J. Ind. Eng. Chem.* **2019**, 74, 108-117.
 19. Fu, Y. F.; Li, Y. Q.; Liu, Y. F.; Huang, P.; Hu, N.; Fu, S. Y. High-Performance Structural Flexible Strain Sensors Based on Graphene-Coated Glass Fabric/Silicon Composite. *ACS Appl. Mater. Inter.* **2018**, 10, 35503-35509.
 20. Liu, Q.; Chen, J.; Li, Y.; Shi, G. High-Performance Strain Sensors with Fish-Scale-Like Graphene-Sensing Layers for Full-range Detection of Human Motions. *ACS Nano* **2016**, 10, 7901-7906.
 21. Wang, Y.; Hao, J.; Huang, Z.; Zheng, G.; Dai, K.; Liu, C.; Shen, C. Flexible Electrically Resistive-Type Strain Sensors Based on Reduced Graphene Oxide-Decorated Electrospun Polymer Fibrous Mats for Human Motion Monitoring. *Carbon* **2018**, 126, 360-371.
 22. Xu, M.; Qi, J.; Li, F.; Zhang, Y. Highly Stretchable Strain Sensors with Reduced Graphene Oxide Sensing Liquids for Wearable Electronics. *Nanoscale* **2018**, 10, 5264-5271.
 23. Park, J. J.; Hyun, W. J.; Mun, S. C.; Park, Y. T.; Park, O. O. Highly Stretchable and Wearable Graphene Strain Sensors with Controllable Sensitivity for Human Motion Monitoring. *ACS Appl. Mater. Inter.* **2015**, 7, 6317-6324.
 24. Tian, H.; Shu, Y.; Cui, Y. L.; Mi, W. T.; Yang, Y.; Xie, D.; Ren, T. L. Scalable Fabrication of High-Performance and Flexible Graphene Strain Sensors. *Nanoscale* **2014**, 6, 699-705.
 25. Liang, A.; Jiang, X.; Hong, X.; Jiang, Y.; Shao, Z.; Zhu, D. Recent Developments Concerning the Dispersion Methods and Mechanisms of Graphene. *Coatings* **2018**, 8, 33.
 26. Huang, K.; Yu, H.; Xie, M.; Liu, S.; Wu, F. Effects of Poly(ethylene glycol)-Grafted Graphene on the Electrical Properties of Poly(lactic acid) Nanocomposites. *RSC Adv.* **2019**, 9, 10599-10605.
 27. Qi, X.; Yao, X.; Deng, S.; Zhou, T.; Fu, Q. Water-Induced Shape Memory Effect of Graphene Oxide Reinforced Polyvinyl Alcohol Nanocomposites. *J. Mater. Chem. A* **2014**, 2, 2240-2249.
 28. Goncalves, G.; Marques, P. A. A. P.; Barros-Timmons, A.; Bdkin, I.; Singh, M. K.; Emami, N.; Grácio, J. Graphene Oxide Modified with PMMA via ATRP as a Reinforcement Filler. *J. Mater. Chem.* **2010**, 20, 9927-9934.
 29. Wang, Y.; Chen, X.; Zhu, W.; Huang, X.; Tang, X. Z.; Yang, J. A Comparison of Thermoplastic Polyurethane Incorporated with Graphene Oxide and Thermally Reduced Graphene Oxide: Reduction is Not Always Necessary. *J. Appl. Polym. Sci.* **2019**, 136, 47745.
 30. Holden, G.; Hansen, D. R. *Thermoplastic Elastomers*, 3rd ed.; Carl Hanser Verlag: München, 2004; pp 45-67.
 31. Ouhadi, T.; Abdou-Sabet, A.; Wussow, H.-G.; Ryan, L. M.; Plummer, L.; Baumann, F. E.; Lohmar, J.; Vermeire, H. F.; Malet, L. G. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, 2000.
 32. Balsamo, V.; Lorenzo, A. T.; Müller, A. J.; Corona-Galván, S.; Trillo, L. M. F.; Quiteria, V. R. S. Structure, Properties and Applications of ABA and ABC Triblock copolymers with Hydrogenated Polybutadiene Blocks. In *Block Copolymers in Nanoscience*; Lazzari, M., Liu, G., Lecommandoux, S., Eds.; Wiley-VCH Verlag & GmbH Co. KGaA: Weinheim, 2006; pp 367-389.
 33. Lecommandoux, S.; Lazzari, M.; Liu, G. Chapter 1, An Introduction to Block Copolymer Applications: State-of-the-Art and Future Developments. In *Block Copolymers in Nanoscience*; Lazzari, M., Lecommandoux, S., Liu, G., Eds.; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, 2006; pp 1-7.
 34. He, M.; Zhang, R.; Zhang, K.; Liu, Y.; Su, Y.; Jiang, Z. Reduced Graphene Oxide Aerogel Membranes Fabricated Through Hydrogen Bond Mediation for Highly Efficient Oil/Water Separation. *J. Mater. Chem. A* **2019**, 7, 11468-11477.
 35. Gupta, B.; Kumar, N.; Panda, K.; Kanan, V.; Joshi, S.; Visoly-Fisher, I. Role of Oxygen Functional Groups in Reduced Graphene Oxide for Lubrication. *Sci. Rep.* **2017**, 7, 45030.
 36. Fu, Y.; Li, Y.; Liu, Y.; Huang, P.; Hu, N.; Fu, S. High-Performance Structural Flexible Strain Sensors Based on Graphene-Coated Glass Fabric/Silicon Composite. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2018**, 10, 35503-35509.
 37. O' Connor, T. F.; Fach, M. E.; Miller, R.; Root, S. E.; Mercier, P. P.; Lipomi, D. J. The Language of Glove: Wireless Gesture Decoder with Low-Power and Stretchable Hybrid Electronics. *PLoS ONE* **2017**, 12, e0179766.

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