

유동 화학을 이용한 고분자의 분자량 분포 설계

고분자의 분자량 분포는 가공성과 기계적 물성에 큰 영향을 미치지만, 설계자가 원하는 분자량 분포를 가지는 고분자를 합성하는 것은 매우 어려운 일이며 주로 좁은 분자량 분포를 가지는 고분자를 합성하는 기술 위주로 연구되어 왔다.

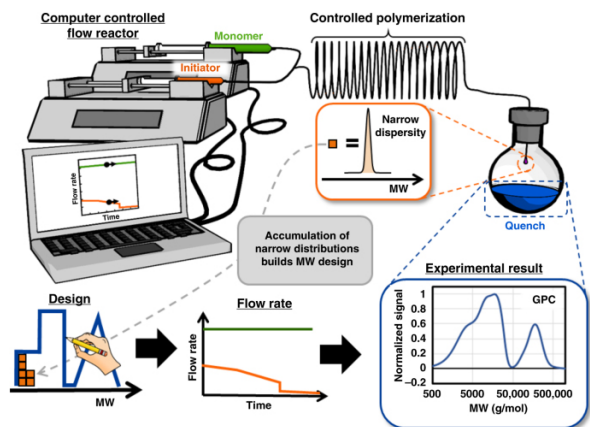


그림 1. 유동 반응을 이용한 분자량 분포 제어 방법.

본 연구에서는 가공성과 물성 목표를 동시에 만족시킬 수 있도록 특정 분자량 분포를 도출하기 위한 합성 프로토콜의 정확한 설계 방법을 제시되었다. 해당 프로토콜 설계를 위하여 유체역학, 중합반응 속도론과 실험 결과를 이용하여 반응기를 설계하였으며, 락타이드 개환 중합, 스티렌 음이온 중합과 개환 복분해 중합법을 통해 해당 프로토콜의 성능을 검증하였다(그림 1). 또한 설계된 반응기를 이용하여 합성한 고분자의 분자량 분포를 예측할 수 있는 수학적 모델을 제시하였으며, 이러한 일련의 방법론은 실제 산업에서 고분자 가공성 및 물성을 정밀하게 제어해야 하는 엔지니어들에게 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구결과는 “General route to design polymer molecular weight distributions through flow chemistry”라는 제목으로 2020년 *Nature Communications*에 게재되었다.

©D. J. Walsh, et al, *Nat. Commun.*, **11**, 3094 (2020), DOI: 10.1038/s41467-020-16874-6

Layer-by-Layer Scraping 법을 이용하여 제조된 그래핀 나노 복합재료

웨어러블 전자기기에 응용하기 위하여 유연하면서도 전기적, 기계적 성능을 유지할 수 있는 탄소기반 복합재료에

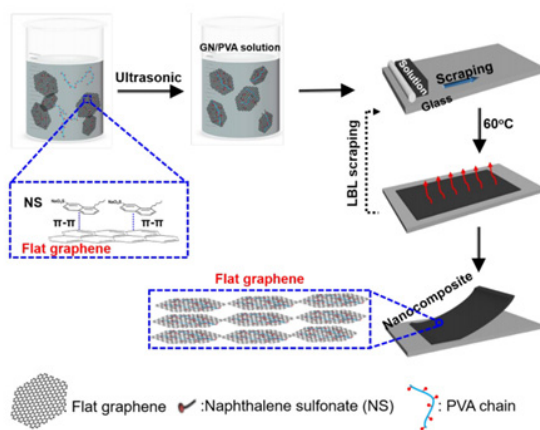
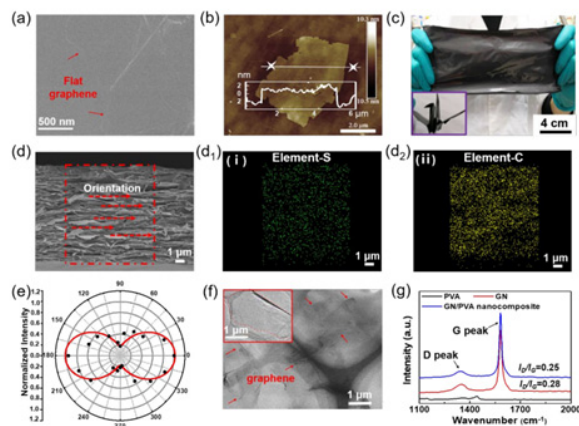


그림 2. LBL Scraping 법을 이용한 그래핀 나노복합재료의 제조와 평가 결과.



관한 필요성이 증가되고 있으나, 탄소재료는 복합재료 내에서 무작위로 네트워크를 이루려는 성향이 있다. 따라서 이를 이용하여 이방성을 가지면서도 열적 및 전기적 전도성이 우수한 나노복합재료를 만드는 것은 쉽지 않은 일이다.

본 연구에서는 NS(naphthalene sulfonate)로 처리한 그래핀과 PVA(polyvinyl alcohol)를 사용하여 LBL(Layer-by-Layer)법으로 나노복합재료를 제조하였다. 특히 나노복합재료 층이 적층될수록 입자가 평평한 모양과 고 배향성을 유지할 수 있게 하기 위하여 LBL Scraping 법을 새롭게 제안하였다. NS는 그래핀과 PVA 사이에서 다리역할(π - π 결합)을 해주어 그래핀이 PVA 용액 내에서 더 균일하게 분산되게 해주고 Scraping을 하는 동안 더 쉽게 배향을 하도록 도와준다. 10 wt%의 그래핀을 넣은 나노복합재료의 열전도성은 In-plane과 Out-of-plane 방향으로 각각 $13.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 과 $0.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 이고, 전기전도성은 각각 $10^{-1} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 과 $10^{-10} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 수준으로 측정됨에 따라 LBL Scraping으로 제조된 나노 복합재료가 매우 뛰어난 이방성을 가질 뿐만 아니라 PVA에 비해 향상된 유연성과 인장 물성을 가지는 것이 확인되었다(그림 2). 본 연구에서 제안한 새로운 그래핀 나노복합재료 필름 제조기술은 에너지, 전자 센서, 전자기 차폐 및 금속 부식 방지 분야에 응용되어 다양하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구결과는 “Flexible graphene nanocomposites with simultaneous highly anisotropic thermal and electrical conductivities prepared by engineered graphene with flat morphology”라는 제목으로 2020년 *ACS Nano*에 게재되었다. <Y. Zhuang, K. Zheng, et al., *ACS Nano*, online published (2020), DOI: 10.1021/acsnano.0c04456>

PAS 기능화된 나노그래핀을 이용한 탄소섬유복합재료의 기계적 물성 향상

탄소섬유복합재료는 탄소섬유 직물에 고분자 수지를 함

침시켜 성형한 물질로 비강도, 비강성 등의 기계적 물성이 매우 뛰어나 4차 산업혁명시대에 경량화를 위한 최적의 소재로 평가받고 있다. 최근에는 이러한 탄소섬유복합재료의 기계적 물성을 더욱 향상시키거나 새로운 특성을 부여하기 위해 나노미터 크기의 또 다른 보강재를 도입한 하이브리드 탄소섬유복합재료가 활발히 연구되고 있다.

본 연구에서는 에폭시 탄소섬유복합재료에 PAS(poly(4-aminostyrene))로 기능화된 나노그래핀(PAS-GNP)을 도입하였다. PAS는 π - π 결합을 통해 나노그래핀을 기능화하며, PAS의 아민 작용기는 에폭시와의 화학적 결합을 형성하는 역할을 한다. PAS-GNP가 분산된 에폭시 수지를 함침시킨 탄소섬유 직물을 적층한 후, 이를 Autoclave를 이용하여 탄소섬유복합재료를 성형하였다. 4%의 PAS-GNP가 에폭시 수지에 분산된 하이브리드 복합재료는 층간전단강도(ILSS)와 인성(toughness)이 각각 252%와 142%로 향상되었는데, 이 수치는 현재까지 발표된 다른 하이브리드 탄소섬유복합재료의 결과와 비교하여 가장 뛰어난 결과를 보였다는데 큰 의의가 있다(그림 3).

본 연구결과는 “Fabrication and mechanical properties of carbon fiber/epoxy nanocomposites containing high loadings of noncovalently functionalized graphene nanoplatelets”라는 제목으로 2020년에 *Composites Science and Technology*에 게재되었다.

<Soon H. Hong et al., *Compos. Sci. Technol.*, **192**, 108101 (2020), DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108101>

냉방 의류를 위한 Active Cooling Fibrous Membrane 개발

냉방 의류(cooling fabrics)는 공간 전체를 시원하게 하는데 필요한 에너지를 줄일 뿐 아니라 개인의 쾌적한 생활을 가능하게 하여 미래형 의복으로 주목받고 있다. 이를 위하여 사람의 몸에서 나오는 열을 빠르게 방출하기 위한 높은

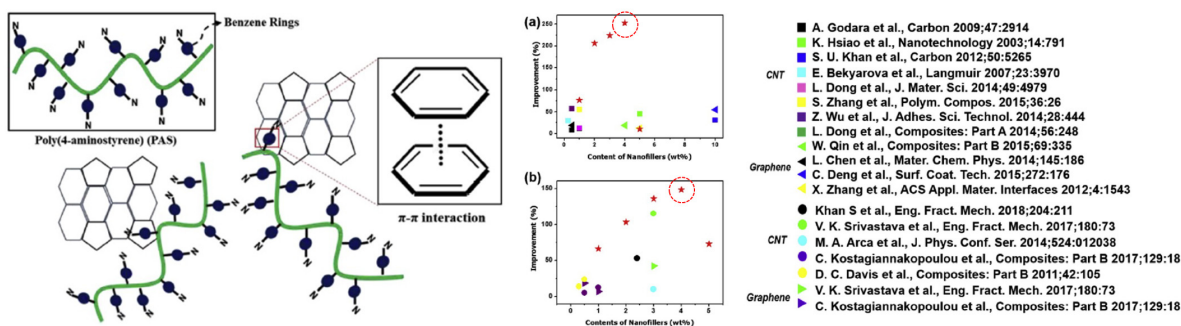


그림 3. PAS-GNP의 구조와 이를 이용한 하이브리드 복합재료의 기계적 물성 평가 결과.

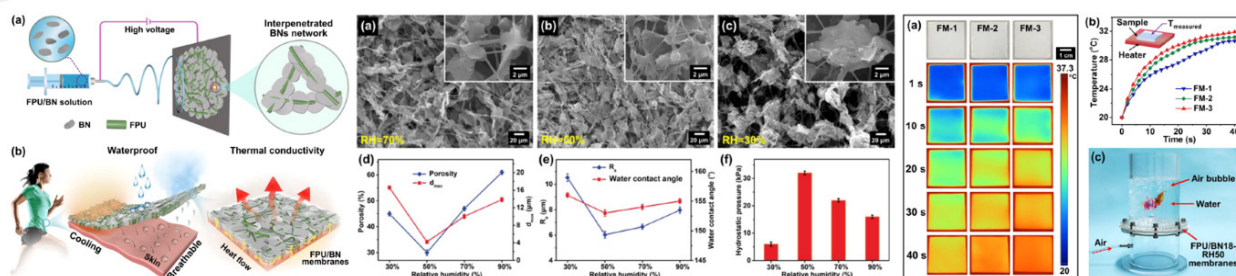


그림 4. FPU/BN 나노섬유 Membrane의 제작 및 냉방 성능 평가.

열전도율, 땀의 방출을 위한 수분 투과성과 방수 성능을 위한 소수성 등 여러 기능을 가지는 섬유 직물의 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 fluorinated polyurethane(FPU)와 boron nitride(BN)를 이용하여 높은 열전도율과 수분 투과율을 지닌 초소수성(superhydrophobic) 나노섬유 멤브레인을 제작하여 열과 땀의 배출이 용이하면서 외부의 수분은 차단할 수 있는 직물을 개발하였다. 사용된 BN 필러는 전기방사를 통해 우레탄 나노섬유 위에 네트워크를 형성함으로써 섬유의 다공성 구조를 유지하여 수분 투과율을 유지하면서도 열전도성을 개선하였고, 소수성 고분자의 사용으로 인해 초소수성을 구현할 수 있었다. 제작한 membrane은 평면 상에서 $17.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 수직 방향으로 $0.29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 의 매우 높은 열전도율과 $11.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 의 높은 수분투과도를 보여주었으며, 32 kPa의 정수압 조건에서 153의 수분 접촉각을 나타내어 우수한 소수성을 확보하는 등 뛰어난 냉각 성능을 나타내었다(그림 4). 본 연구에서 개발한 membrane은 우수한 자체 냉방 성능을 가지면서도 제작이 용이하여 다른 분야로의 적용이 활발하게 일어날 것으로 기대된다.

본 연구결과는 “Thermoconductive, moisture-permeable, and superhydrophobic nanofibrous membranes with interpenetrated boron nitride network for personal cooling fabrics”라는 제목으로 2020년에 *ACS Applied Materials and Interfaces*에 게재되었다.

<Yang Si and Bin Ding *et al.*, *ACS Appl. Mater. Inter.*, **12**, 32078 (2020), DOI: 10.1021/acsami.0c04486>

접착성 나노입자를 이용한 복합재료의 계면 특성 조절

고분자복합재료는 유·무기 보강재가 고분자 매트릭스 안에 분산되어 있는 형태의 재료로 보강재와 매트릭스 사이의 계면 특성은 복합재료의 최종 성능에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 셀룰로오스 섬유와 PMMA 복합재료의

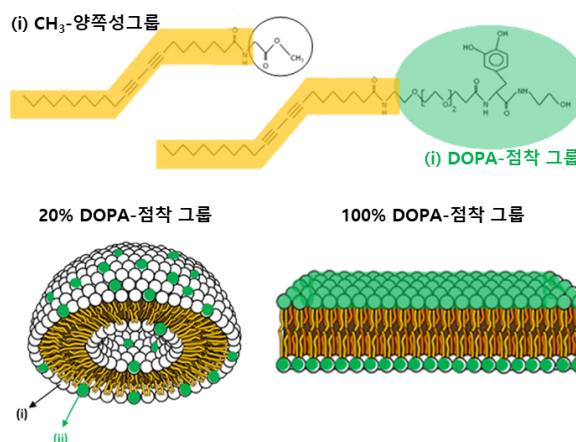


그림 5. CH₃-양쪽성 그룹과 DOPA-접착 그룹으로 이루어진 접착성 나노입자.

계면 특성을 조절하기 위하여 CH₃-양쪽성 그룹과 DOPA-접착 그룹으로 이루어진 접착성 나노입자를 이용하였다. DOPA-접착 그룹의 비율이 20%일 때, 나노입자에 의한 계면 결합력 및 최종 복합재료의 성능이 가장 뛰어났고 DOPA-접착 그룹의 비율이 증가함에 따라 구형의 나노입자는 이중층 필름의 형태로 변형되어 계면 결합력 및 복합재료의 성능은 점차적으로 감소하였다(그림 5). 본 연구에 따르면 DOPA-접착 그룹과 CH₃-양쪽성 그룹으로 이루어진 나노입자는 셀룰로오스 섬유뿐만 아니라 다양한 유·무기 보강재료의 응용이 가능하므로 복합재료의 계면 특성을 효과적으로 조절할 수 있는 유용한 도구가 될 것으로 전망된다.

본 연구결과는 “Engineering the cellulose fiber interface in a polymer composite by mussel-inspired adhesive nanoparticle with intrinsic stress-sensitive responsivity”라는 제목으로 2020년에 *ACS Applied Materials and Interfaces*에 게재되었다.

<Pieter Samyn, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 28819 (2020), DOI: 10.1021/acsami.0c05960>

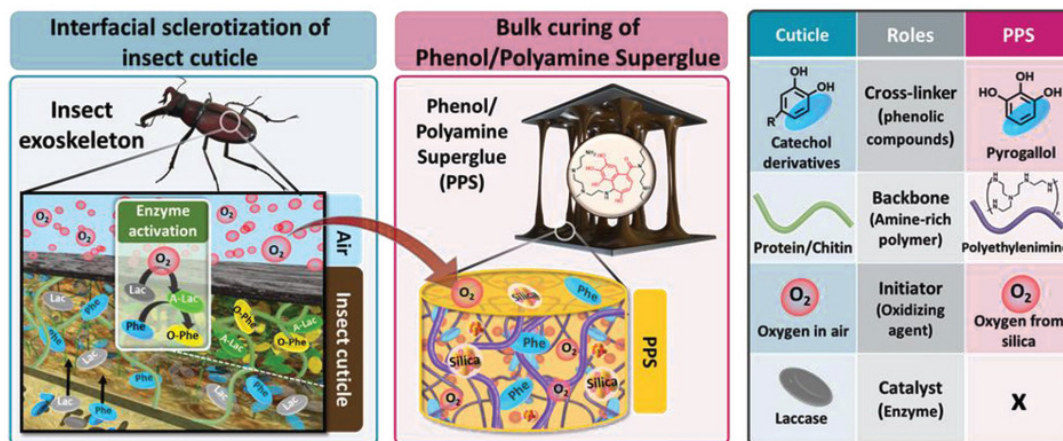


그림 6. 곤충 표피의 경화 과정을 모사한 페놀/폴리아민 초강력 접착제.

곤충 표피의 경화 과정을 모사한 페놀-아민 초강력 접착제

경화 과정을 통해 형성된 곤충의 갑피가 매우 높은 강성을 나타내는 현상에 착안하여 본 연구에서는 페놀 분자와 아민 분자를 사용하여 곤충의 경화 과정을 모사함으로써 친환경적이며 생체 적합성을 지닌 수성 초강력 접착제를 제조하였다. 별도의 합성과정 없이 물, 페놀 및 폴리아민만을 사용하였고 공기 중이나 물속에 존재하는 산소가 개시제로 작용하여 초강력 접착제의 경화 과정에 필요한 페놀계 라디칼/퀴논을 생성하였다. 이 접착제는 상용화된 에폭시 접착제와 비슷한 6 MPa 이상의 랩전단강도를 가지기 때문에 세라믹, 나무, 직물, 플라스틱과, 금속 등 다양한 기판에 부착이

가능하며, 특히 생체적합성이 우수하여 생체 조직에도 부착이 가능하다. 수성의 친환경 접착제로서 수 초 이내에 강력한 접착력을 발휘하여 효과적으로 환부를 접착할 수 있을 뿐 아니라, 제조 과정이 쉽고 공정 원가가 저렴하여 일상생활뿐만 아니라 다양한 산업으로의 확대 적용이 기대된다.

본 연구결과는 “A Phenol-Amine Superglue Inspired by Insect Sclerotization Process”라는 제목으로 2020년 *Advanced Materials*에 게재되었다.

<Y. Wang *et al.*, *Adv. Mater.*, 2002118 (2020), DOI: 10.1002/adma.202002118>

<성동기, email: dgseong@pusan.ac.kr>