

# 지속가능한 엔지니어링 플라스틱 개발을 위한 최신 연구동향

## Recent Research Trends in the Development of Sustainable Engineering Plastics

김영남 · 윤소미 · 정용채 | Young Nam Kim · Somi Yoon · Yong Chae Jung

RAMP Convergence Research Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST),  
92 Chudong-Ro, Bongdong-Eup, Wanju-Gun, Jeonbuk 55324, Korea  
E-mail: ycjung@kist.re.kr

### 1. 서론

미지의 세상으로, 동경의 공간으로 무한한 가능성과 상상력을 펼치고 있는 밤하늘의 달은, 1969년 7월 20일  
닐 올든 암스트롱이 인류 역사상 최초로 성공적인 착륙을 이루며, 작은 그의 발걸음이 새로운 과학기술의 역사를  
여는 계기가 되었다.

이 역사의 시작을 가능케 한 것은 조금 더 거슬러 올라가면, 20세기 중반 특히 1950년대와 1960년대에 걸쳐  
고성능 고분자가 개발되면서부터다. 이 시기는 다양한 산업에서 기계적 및 열적 성능이 뛰어난 재료를 요구하던  
시기였고, 이에 따라 금속과 같은 전통적인 재료를 대체할 수 있는 고성능 플라스틱이 개발되었다. 엔지니어링  
플라스틱(engineering plastic, EP)은 이러한 배경에서 산업의 요구에 맞춰 우수한 특성과 물성을 갖춘 고분자를  
의미한다.

EP는 대량 생산되고 다양한 일상생활에서 사용되는 플라스틱(소위 커머리티 플라스틱, commodity plastic,  
CP)과는 달리, 자동차, 항공 우주, 전자 기기 등 고도의 성능이 요구되는 분야에서 사용되면서 널리 쓰이게 되었다.  
대표적인 사례로 1960년에 듀퐁(Dupont)이 개발한 델린(Delrin, POM)이다.<sup>1</sup> 이 플라스틱은 고강도와 내마모성을  
갖춘 고성능 재료로, 정밀 기계 부품 제작에 사용되었다. 물론 아폴로 우주 프로그램에서도 엔지니어링 플라스틱은  
다양한 우주 관련 기술에 적용되었다. 우주선과 같은 고성능 장비는 극한의 온도, 압력, 방사선 등에 노출되기  
때문에 금속 외에도 높은 내구성과 내열성을 가진 플라스틱이 필수적이다. 대표적인 예로, 나일론(Nylon)과  
같은 엔지니어링 플라스틱은 아폴로 우주선의 여러 내장부품에 사용되었으며, 폴리이미드(polyimide, PI)는  
열 차단재로, 그리고 케블라(Kevlar)와 노멕스(Nomex)는 아폴로 우주복과 우주선의 열 차폐 시스템에 사용되어  
극한의 온도와 우주 공간의 진공에서 승무원과 장비를 보호하는데 기여하였다.<sup>2,3</sup> 또한, 폴리카보네이트

Author



김영남

2017 전북대학교  
유기소재파이버공학과 (학사)  
2022 연세대학교 화공생명공학과  
(박사)  
2022-현재 한국과학기술연구원 RAMP  
융합연구단 YS (Post-Doc.)



윤소미

2024 건국대학교 화학과 (학사)  
2024-현재 한국과학기술연구원 RAMP  
융합연구단 인턴연구원



정용채

2007 건국대학교 섬유공학과 (박사)  
2007 건국대학교신기술사업단 (Post-Doc.)  
2012 Shinshu Univ. ICFP (Post-Doc.)  
2012 Shinshu Univ. ENCs 부교수  
2020 UST 겸임교원, 부교수  
2023 KIST 구조융복합소재연구센터 센터장  
2012-현재 KIST 책임연구원  
2023-현재 KIST RAMP융합연구단 연구단장

(polycarbonate, PC)는 투명한 보호재로 우주 헬멧의 바이저(visor)에 적용되어 충격 및 방사선으로부터 승무원을 보호하였다. 물론 이와 같은 소재들은 가장 최근 화성 탐사 로버(Mars Exploration Rover, MER)의 중요한 임무를 수행하는 부품 등에도 사용되었다.

이처럼 다양한 산업에서 엔지니어링 플라스틱이 중요한 역할을 하고 있지만, 몇 가지 단점이 있으며 그중에서도 환경 문제가 큰 이슈로 부각되고 있다. 특히, 내구성과 화학적 안정성은 장점이자 동시에 환경적인 문제로 이어진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 바이오 기반 플라스틱이나 친환경 재활용 기술, 또는 재활용과 재사용 그리고 재가공(3R, recycle, reuse, reproduce)이 용이한 고효율 플라스틱 소재 기술 등의 개발이 추진되고 있다.

본 특집에서는 지속가능한 엔지니어링 플라스틱 개발을 위한 전략에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 지속가능한 폴리우레탄

Fabio Cicoira 교수 연구팀은 가장 최근 자가치유, 신축성, 그리고 재활용 가능성을 갖춘 폴리우레탄 기반 전도성 블렌드에 관한 연구를 보고하였다(그림 1).<sup>4</sup> 이를 위해 PEDOT(poly(3,4-ethylenedioxythiophene))와 PSS(polystyrene sulfonate)로 이루어진 전도성 고분자와 폴리우레탄을 결합하여, 상기 목적이외에도 전자 폐기물(e-waste) 문제 해결을 동시에 해결하고자 하였다.

이 연구에서는 열적 또는 화학적 자극에 의해 쉽게 끊어지고 재결합될 수 있는 가역적 결합인 디설파이드 결합(disulfide-bond)을 중심으로 동적 공유 결합(dynamically covalent bonds)을

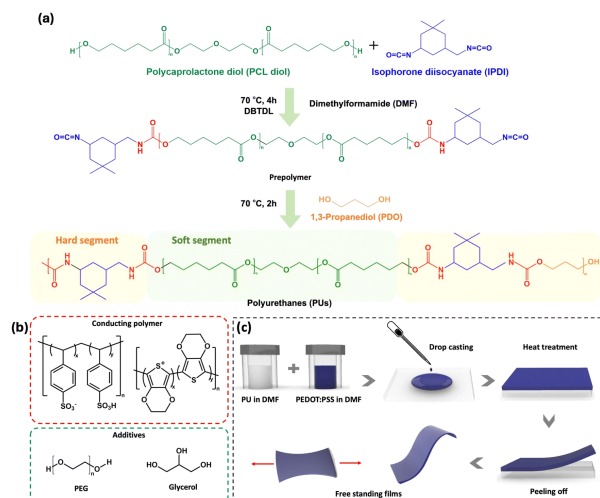


그림 1. (a) 본 연구에서 사용된 polyurethane(PU)의 합성 도식. (b) PEDOT:PSS, PEG, glycerol의 화학구조. (c) PEDOT:PSS와 PU가 혼합된 고분자의 필름 제조 도식.<sup>4</sup>

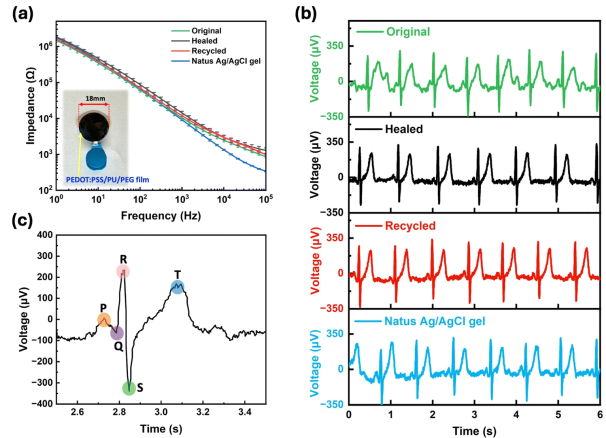


그림 2. PEDOT:PSS/PU/PEG 필름 전극을 이용한 피부 전극 임피던스 측정 및 ECG 신호 기록. (a) 손상 전/후 및 재활용 PEDOT:PSS/PU/PEG 필름의 피부 전극의 임피던스. (b) 손상 전/후 및 재활용 PEDOT:PSS/PU/PEG 필름의 피부 전극의 ECG 신호 기록. (c) PEDOT:PSS/PU/PEG 필름의 심방 및 심실의 재분극파를 나타내는 ECG 신호 기록.<sup>4</sup>

구현하였다. 개발 소재는 손상되었을 때, 상온에서 열을 가하거나 적절한 조건을 제공하면 자가치유가 이루어지며, 30분 내에 물리적 및 전기적 성능을 98% 이상 회복할 수 있었다. 아울러 20회 이상의 재활용 후에도 전도성 및 기계적 성능이 유지되었다(그림 2a,b).

이와 같은 결과는 디설파이드 결합이 열적 자극을 가했을 때 결합이 다시 형성되는 가역적 화학 결합에 기반하여 손상된 영역이 스스로 재배열되어 복구될 수 있는 메커니즘 때문이다. 마지막으로 다수의 재활용 후에도 이 특성이 유지됨을 입증하였다.

그리고 웨어러블 전자기기로서의 응용성을 확인한 결과에서는 우수한 신축성을 갖는 폴리우레탄의 구조적 특징으로 반복적인 기계적 변형에도 쉽게 손상되지 않으며, 신율(350%)와 높은 강도(24.6 MJ/m<sup>3</sup>)를 보여주며, 전기적 전도성(10 S/cm)도 유지한다. 즉, 전도성을 유지하면서도 높은 변형률을 견딜 수 있으며, 이는 전자피부(e-skin), 신축성 센서 등과 같은 고성능 응용 분야에서 큰 가능성을 가지고 있다(그림 2c).

또한, 앞서 동일 소재 구성으로 PEDOT:PSS 박막(1 μm 이상)을 물 또는 수증기에 노출될 때 자가치유 기능을 발휘할 수 있음을 보고하였다. 손상된 부분이 물에 닿으면 PSS-체인이 부풀어 올라 손상된 부위로 이동하고, 그 과정에서 PEDOT 체인이 다시 연결되어 전도 경로를 재형성함을 확인하였다. 자가치유 과정은 150 ms 이내에 매우 빠른 복구가 완료되어 PEDOT:PSS 박막 구조를 활용한 자가치유 회로 및 초민감한 수분 누출 센서로 응용도 검토하였다.<sup>5</sup>

### 2.2 지속가능한 폴리이미드

폴리이미드는 높은 열적 및 기계적 안정성을 가진 고성능

고분자이다.<sup>6</sup> 하지만 이러한 기계적 강도를 유지하면서도 자가치유 능력을 부여하는 것은 도전적인 문제로 여겨졌다. 이는 일반적으로 자가치유 능력을 높이면 기계적 성능이 떨어지는 트레이드오프 관계 때문이다.

한국과학기술연구원(KIST) 정용채 박사 연구팀은 이 문제를 해결하기 위하여 마이크로 캡슐을 이용한 자가치유 폴리아미드와 disulfide bond 결합이 도입된 semi-aromatic 구조의 높은 기계적 강도를 가지면서도 자가치유가 가능한 소재를 디자인하고 개발하였다.<sup>7-9</sup> 아울러 구성요소 간의 조성비 조절을 통해 두 특성을 균형 있게 향상시키는 소재를 개발하는 데 중점을 두었다(그림 3).

해당 자가치유 폴리아미드의 구성요소 중 사용된 4,4'-(4,4'-isopropylidenediphenoxy)bis(phthalic anhydride)(BPADA)와 4,4'-(hexafluoroisopropylidene)diphthalic anhydride(6FDA) 모노머는 각각 methyl 그룹(-CH<sub>3</sub>)과 trifluoromethyl 그룹(-CF<sub>3</sub>)을 가지고 있다. 6FDA의 CF<sub>3</sub> 그룹은 분자간 높은 반발력을 일으키기 때문에 고분자사슬의 강직성이 증대됨으로써 유연성이 떨어진다. 그러나 CF<sub>3</sub> 그룹의 비율이 줄고 BPADA의 CH<sub>3</sub> 그룹이 증가되면 분자간 유연성이 증대되고 고분자간 거리가 줄어들어 charge transfer complex(CTC) 효과도 증가됨으로써 기계적 물성이 우수하면서 유연한 고분자 구조를 얻을 수 있다. 그리고 disulfide bond 결합은 (S-S) 원자가 결합한 구조로, 이 결합은 다양한 자극에서 가역적으로 결합/비결합을 나타낸다.

보고된 소재의 특성을 살펴보면, 자가치유 효율은 약 90% 이상을 기록했으며, 100 °C 이상의 온도에서 30분 내에 기계적 성능을 거의 완전히 회복하는 것을 확인할 수 있다. 특징적으로, 자가치유 후에도 75 MPa 이상의 인장 강도와 2.5 GPa 이상의 탄성계수를 유지한 점이 기존 연구와의 소재 우수성을 강조한다. 이외에도 자가치유 폴리아미드 필름 표면에 탄소나노튜브를 코팅한 후 투명한 유연 디바이스의 기재로도 그 특성을 고찰하였다. 필름 표면 위에 다수의 스크래치가 발생하더라도, 100 °C 내외의 열처리를 통해 손상된 부위는 물론 끊어진 전극도 함께 자가치유되어 초기 물성을 회복함을 확인하였다. 이와

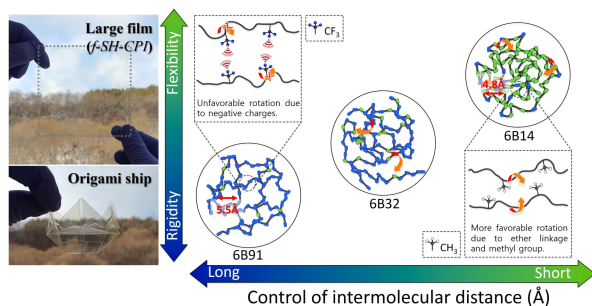


그림 3. 자가치유 폴리아미드의 구조제어를 통한 고분자간 거리와 유연성이 조절되는 모식도.<sup>9</sup>

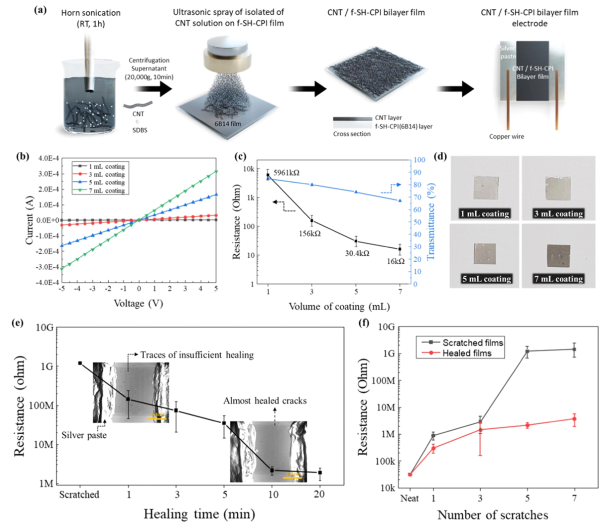


그림 4. CNT/f-SH-CPI(6B14) 이중층 전극의 특성. (a) 이중층 전극의 제조 모식도 (b) current-potential( $I-V$ ) 그래프 (c) 코팅 양에 따른 저항변화와 투명도를 나타낸 그래프, (d) 코팅 양에 따른 이중층 전극 필름의 사진, (e) 치유 시간에 따른 저항 변화 관찰(손상이 입혀진 횟수: 5, 치유조건: 열풍기, 105 °C), (f) 손상 횟수에 따른 전극의 치유 전/후의 저항 변화(치유조건: 열풍기, 105 °C, 10분).<sup>9</sup>

같은 결과로 전기적 절연재나 전자기기용 소재로의 응용 가능성을 크게 확장하였다(그림 4).

일반적으로 폴리아미드는 높은 유리전이온도와 열적 안정성을 가지고 있어, 고온 환경에서 안정적인 절연 성능을 유지할 수 있다. 이는 고온 환경에서 전기적 절연이 중요한 산업 응용에 매우 적합한 특성이다.

베이징 과학기술대학교의 Zha 교수 연구팀은 폴리아미드의 응용범위를 고온 및 전자기기의 절연소재로 사용할 때 발생하는 문제점을 자가치유 기술로 해결할 수 있음을 보고하였다.<sup>10</sup>

이 연구에서는 Schiff base결합을 유도하기 위해 사용된 화합물인 아민 말단 폴리아미드 전구체(ATPP)는 1,4-bis(4-amino-2-trifluoromethylphenoxy) benzene(6FAPB)과 9,9-bis(4-amino-3-fluorophenyl) fluorene(FFDA), 그리고 4,40-(4,40-Isopropylidenediphenoxy) diphthalic anhydride(BPADA)을 NMP에서 중합하여 합성되었다. 합성된 ATPP는 benzene-1,3,5-tricarboxaldehyde(BTA)와 함께 결합하여 Schiff base 동적 결합을 완성하게 된다(그림 5). 최종 합성된 폴리아미드는 고온에서도 자가치유 성능이 발현됨은 물론 자가치유 후에도 인장 강도 60 MPa 이상과 탄성 계수 4 GPa 이상을 유지했다. 열적성능의 경우 220 °C 이상의 높은 열적 안정성을 유지하며, 이는 고온 환경에서도 소재가 변형되지 않고 자가치유를 유지할 수 있음을 보여주었다. 이는 기존 고성능 고분자의 기계적 강도를 유지하면서도 자가치유가 가능하다는 점에서 혁신적인 결과이다.

한편, 폴리아미드는 고온 절연체로서 높은 절연성을 요구하는 전기적 응용 분야에서 많이 사용되고 있다. 특히,



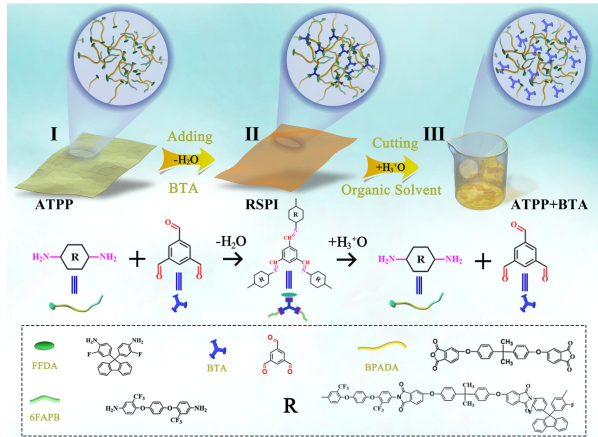


그림 5. RSPI 필름의 합성 및 분리 과정(R은 ATPP를 나타냄).<sup>10</sup>

전기 절연 파괴는 고전압 환경에서 발생할 수 있는 주요 문제로, 절연체가 높은 전압을 견디지 못하고 전류가 흐르게 되는 현상을 의미한다. 따라서 절연 파괴 강도가 높은 소재는 전기 절연 성능을 보장하는 데 중요한 역할을 하게 된다.

연구에서 개발된 RSPI(동적 교차 결합 폴리이미드) 필름은 358 kV/mm 이상의 절연 파괴 강도를 나타내며, 이는 기존 폴리이미드 필름과 비교했을 때 우수한 절연 성능을 유지하는 결과이다. 전기적 손상을 입은 후에도 자가치유 과정을 통해 절연 파괴 강도가 일부 복구되었다. 이때 자가치유 메커니즘을 살펴보면, Schiff base 결합에 의존한다(그림 6).

전기적 손상이 발생한 후, 손상 부위에 RSPI 필름의 분해 용액(DS)을 적용하고, 이를 실온에서 건조한 후 100 °C에서 0.5시간 동안 가열하여 자가치유를 촉진시킨다. 이 과정에서, Schiff base 결합이 다시 형성되어 구조적 복구가 이루어지게 된다. 다시 말해, 전기적 손상 후 복구 과정을 살펴보면 절연 파괴 또는 코로나 손상에 의해 생성된 구멍은 DS 용액을 통해 채워지며, 용매가 증발되고 남은 결합들이 재구성되어 자가 치유가 이루어지는 원리다. 물론 자가치유 후, 필름의 절연 성능은 복구되지만, 반복적인 자가치유와 재활용 과정을 통해

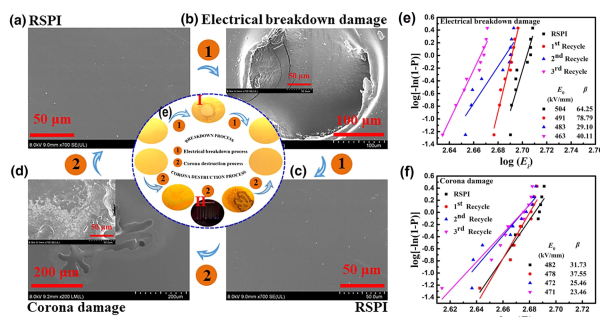


그림 6. (a,c) RSPI film의 SEM 사진, (b,d) 코로나 방전 후, RSPI film의 표면 손상을 나타낸 SEM 이미지, (e,f) 절연 파괴 및 코로나 방전 후의 재활용 전/후에 따른 절연강도.<sup>10</sup>

일부 절연 성능 저하가 발생할 수 있으며, 이러한 저하는 주로 교차 결합의 손실에 기인한다. 아울러 Corona 손상(전기적 손상) 후에도 필름이 자가치유 과정을 통해 약 358 kV/mm의 절연 파괴 강도를 유지하며, 이로 인해 반복적인 전기적 손상 후에도 실용적인 절연 특성을 보존할 수 있음을 확인하였다. 결론적으로, 이 연구는 동적 결합을 도입하여 자가치유와 재활용 가능성을 가진 폴리이미드 필름이 고성능 절연 특성을 유지할 수 있음을 입증했다.

## 2.3 지속가능한 섬유강화복합소재

비트리머 복합소재는 동적 공유 결합을 사용하여 자가치유와 재활용이 가능한 고분자 복합재료로, 최근 연구들은 각각 구체적인 화학적 구조와 메커니즘을 기반으로 이 기능을 실현하였다.

쓰촨 대학의 Xia 교수 연구팀은 아실세미카바자이드(acylsemicarbazide, ASC) 기반의 동적 공유 결합을 사용하였다(그림 7).<sup>11</sup>

ASC 구조는 동적 공유 결합(dynamic covalent bonding)을 가능하게 하는 몇 가지 핵심적인 특징을 가지고 있다. ACS는 -CO-NH-와 -NH-NH-CO- 두 가지 주요 화학적 그룹으로 구성된다. 이들 그룹은 외부 자극(특히 열)에 의해 결합이 가역적으로 형성되거나 끊어질 수 있다. 구체적으로, ASC의 N-N 결합은 반응성이 높아, 결합이 열적 자극에 반응하여 재구성될 수 있다. 이 동적 결합은 열을 가하면 끊어지며, 냉각되거나 외부 조건이 적절하게 조정되면 다시 결합이 형성된다. 이러한 성질 덕분에 자가치유가 가능해지며, 손상된 부위가 외부 자극에 의해 다시 결합될 수 있다. 연구 결과, 94.4%의 자가치유 효율을 기록했으며, 재활용 후에도 소재는 90% 이상의 초기 성능을 유지했다. 이 결합 구조는 반복적인 재활용에도 복합소재의 기계적 성능을 보존할 수 있는 중요한 요소로 작동했다. 결론적으로, ASC는 가역적인 N-N 결합

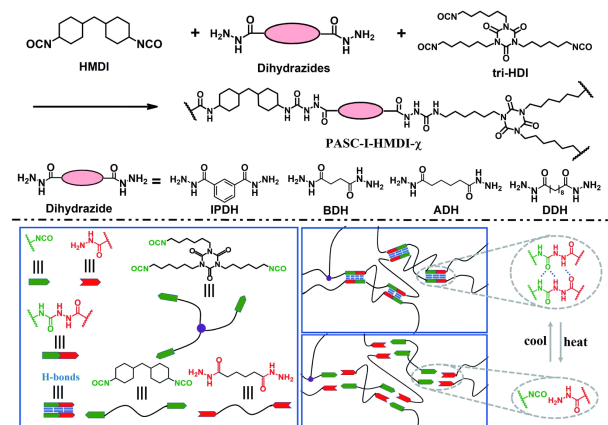


그림 7. Polyacylsemicarbazide(PASC)의 화학 합성 경로 및 ASC 부분의 동적 과정 모식도.<sup>11</sup>



구조를 통해 열적 자극에 따라 결합을 재형성할 수 있는 특성을 가지며, 이를 통해 동적 공유 결합을 실현하고, 자가치유 및 재활용이 가능한 고분자 구조로 사용할 수 있다(그림 8).

쓰촨 대학의 Li Chen 교수 연구팀은 Diels-Alder 반응을 활용한 동적 공유 결합을 통해 자가치유와 재활용이 가능한 탄소섬유 강화 복합소재를 개발했으며, 이를 통해 난연성도 개선한 연구를 보고하였다(그림 9).<sup>12</sup>

이 연구에서는 Diels-Alder 반응을 기반으로 한 재활용 및 자가치유 탄소섬유 복합소재는 기존 연구와 차별화되는 몇 가지 구조적 특징과 구체적인 성능 결과를 보여주었다. 이 연구는 인접 분자 엔지니어링(neighboring molecular engineering)을 도입하여, 자가치유 및 재활용 성능을 극대화하고 난연성까지 개선한 점이 주요 성과로 평가된다. Diels-Alder 반응은 다이엔(diene)과 디엔필(dienophile)간의 가역적 고리 추가 반응(cycloaddition)을 기반으로 하며, 반응의 열적 가역성을 이용해 복합소재의 결합을 깨뜨리거나 다시 형성할 수 있다.

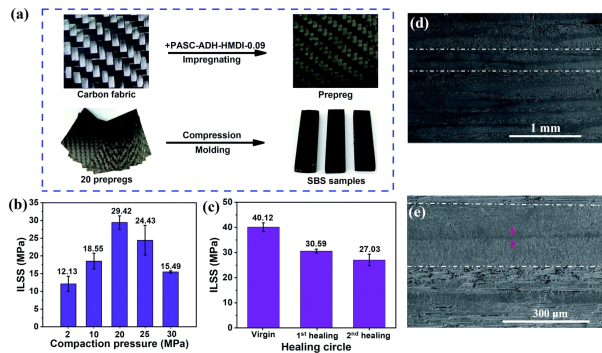


그림 8. (a) CFRP 프리프레그 제조와 SBS 테스트 시편 준비 과정 (b) 다양한 압축 압력 하에서 CFRP-1 복합재의 ILSS 값. (c) 처음 및 치유된 CFRP-2 복합재의 ILSS 값. (d, e) SBS 테스트 샘플의 단면 구조에 대한 SEM 이미지(흰색 점선: 수지와 섬유 사이의 계면, 빨간색 화살표: 두 개의 프리프레그 사이의 계면).<sup>11</sup>

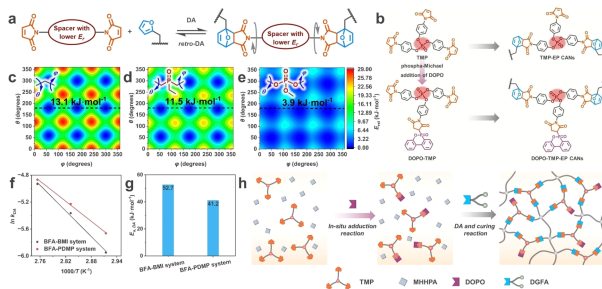


그림 9. (a) 이 작업에서는 Er이 낮은 DA 사이클로 부가 반응에 기반한 CAN의 제안된 설계 개념을 제시합니다. (b) TMP-EP 및 DOPO-TMP-EP의 DA CAN에 대한 구조 설계. 서로 다른 스페이서를 갖는 모델 분자에 대한  $\theta$  및  $\phi$ 의 각  $10^\circ$  변화( $\theta=0-360^\circ$  및  $\phi=0-360^\circ$ )를 갖는 2차원 잠재 에너지 표면: (c) 프로판(M1), (d) 트리메틸포스핀 산화물(M2) 및 (e) 트리메틸 인산(M3). (f) 반응 속도 상수 대  $1000/T$ 의 아레니우스 플롯  $1000/T$ . (g) BFA-BMI 및 BFA-PDMP에 대한 DA 반응 활성화 에너지( $E_{a,DA}$ ) (h) DOPO-TMP-EP의 DA CAN 제작에 대한 개략적 설명.<sup>12</sup>

이 연구는 분자 구조의 인접 조정(neighboring molecular adjustment)을 통해 결합 재형성 속도를 최적화하여, 높은 반응 효율과 지속적인 기계적 성능을 유지하도록 설계되었다. 이 구조는 고온에서 결합이 끊어지고, 온도를 낮추면 다시 결합이 형성되는 특성을 지닌다.

자가치유 성능은 고온에서 동적 결합이 깨지면서 손상된 부분을 복구하는 원리로 작동한다.  $150^\circ\text{C}$  이상의 고온 환경에서도 자가치유 효율은 94.6%에 도달하였으며, 자가치유 후에도 복합소재의 기계적 성능이 90% 이상 유지되었다. 이러한 성능은 인접 분자 엔지니어링 덕분에 이루어졌으며, 분자 구조의 조정으로 인해 자가치유가 빠르고 효율적으로 진행된다. 재활용 가능성은 동적 공유 결합이 깨지고 다시 형성되는 과정을 통해 이루어진다. 연구에서는 5회 이상 재활용을 반복했음에도, 복합소재의 성능 저하가 10% 미만으로 제한되었다. 이는 기존 Diels-Alder 반응 기반 시스템에서 반복 재활용 시 성능 저하가 일어났던 것과 비교해 크게 개선된 결과다. 아울러 고온에서의 가역적 반응을 이용해, 복합소재는 재활용 후에도 초기 기계적 성능을 거의 그대로 유지할 수 있었습니다. 결국 연구에서 사용된 탄소섬유 강화 복합소재는 이 동적 결합 구조 덕분에 고온에서 자가치유가 가능하며, 재활용성도 향상되었다.

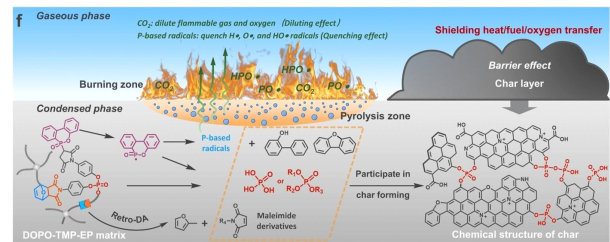


그림 10. DOPO-TMP-EP의 제안된 난연 메커니즘.<sup>12</sup>

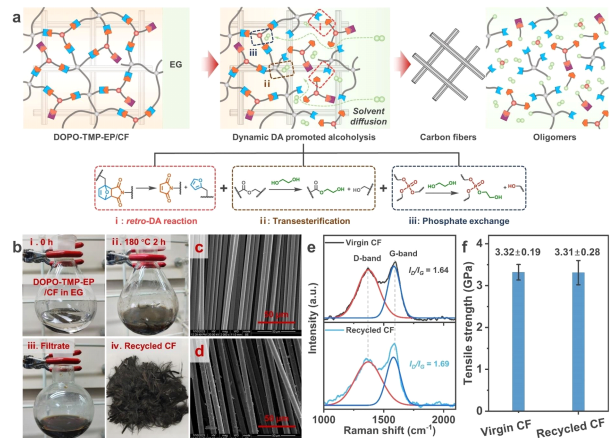


그림 11. (a) DOPO-TMP-EP/CF 재활용 공정의 개략적 설명. (b) DOPO-TMP-EP/CF 재활용 공정의 사진. (c, d) SEM 이미지. (e) 라만 스펙트럼 및 (f) 순수 및 재활용 CF의 인장 강도.<sup>12</sup>

이 연구의 또다른 주요 성과는 복합소재의 난연성(flame retardancy)을 향상시킨 것이다. 인접 분자 구조는 고온에 노출되었을 때 결합이 끊어지며, 이 과정에서 발생하는 에너지를 흡수해 열 분해를 지연시킨다. 그 결과, 복합소재는 화재 발생 시 난연성을 20% 이상 개선할 수 있었다. 이는 기존 Diels-Alder 시스템에 비해 큰 장점으로 부각된다(그림 10, 11).

오크리지 국립연구소 Saito 박사 연구팀은 비트리머 복합소재에서 다중 재활용 가능성을 탐구하는 중요한 연구를 보고하였다(그림 12).<sup>13</sup> 이 연구는 탄소섬유 강화 비트리머 복합소재의 기계적 성능을 유지하면서도 반복적인 재활용을 통해 새로운 소재로 전환할 수 있는 방법을 제시하였다. 기존 열경화성 복합소재가 가진 재활용의 어려움을 극복하면서도, 열가소성 복합소재와 비교해 기계적 강도와 내구성을 유지할 수 있는 장점이 있다. 비트리머 시스템에서는 열이 가해지면 분자 간 결합이 가역적으로 깨지고, 냉각 시 재결합하는 동적 공유 결합이 존재한다. 이 시스템은 열가소성과 열경화성 복합소재의 장점을 결합하여, 반복적인 재활용이 가능한 동시에 높은 기계적 성능을 유지할 수 있는 특징을 가지고 있다. 연구에서는 탄소섬유 강화 비트리머 복합소재가 반복적인 재활용 후에도 기계적 강도가 유지됨을 확인하였으며, 이는 복합소재가 다중 사이클 동안 성능 저하 없이 재활용될 수 있음을 보여준다.

실험에서는 다중 재활용 사이클을 통해 소재의 기계적 성능을 측정했으며, 최소 5회 이상 재활용이 가능하다는 결과를 얻었다. 각 사이클 후 복합소재의 강성(stiffness)과 인장 강도(tensile strength)는 기존 성능의 90% 이상을 유지했다. 이는 기존 열경화성 복합소재에서는 불가능했던 성과로, 산업적 재활용 가능성을 크게 확장시킨 결과이다(그림 13).

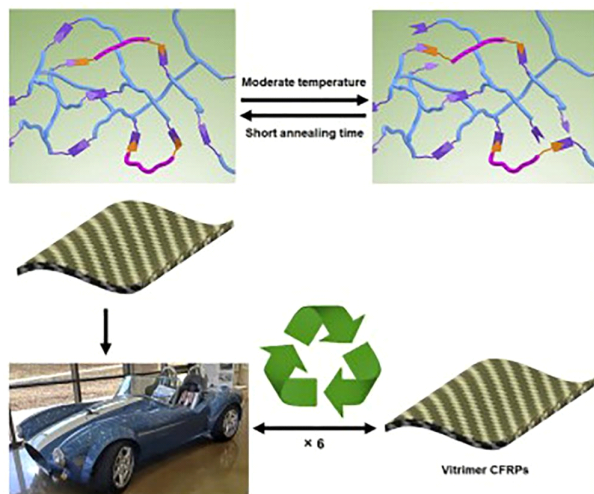


그림 12. 반복적 재활용이 가능한 비트리머 고분자를 기반의 CFRP제조 후 재활용이 가능함을 보인 모식도.<sup>13</sup>

비트리머 복합소재의 또 다른 강점은 맞춤형 설계가 가능하다는 점이다. Saito 박사 연구팀은 소재의 화학적 구조를 조정하여 원하는 특성을 부여하는 방식을 제시하였다. 이 설계를 통해 기계적 성능뿐만 아니라 내화성(flame resistance), 내화학성 등 다양한 특성을 강화할 수 있다고 설명함으로써 환경에 미치는 영향을 최소화할 수 있음을 입증하였다. 결과적으로 다중 재활용 사이클을 거치면서도 폐기물 발생을 최소화하고, 새로운 원료의 사용을 줄여 친환경적 제조 공정을

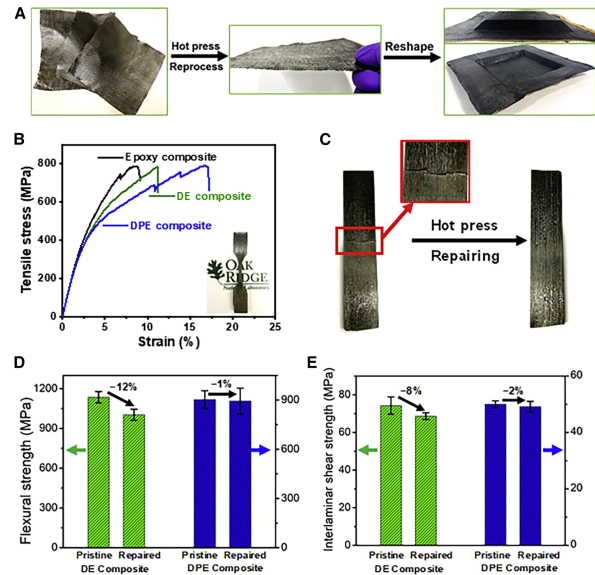


그림 13. 경화재 복합재 적층판의 열성형 및 단방향 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP)의 기계적 특성.<sup>13</sup>

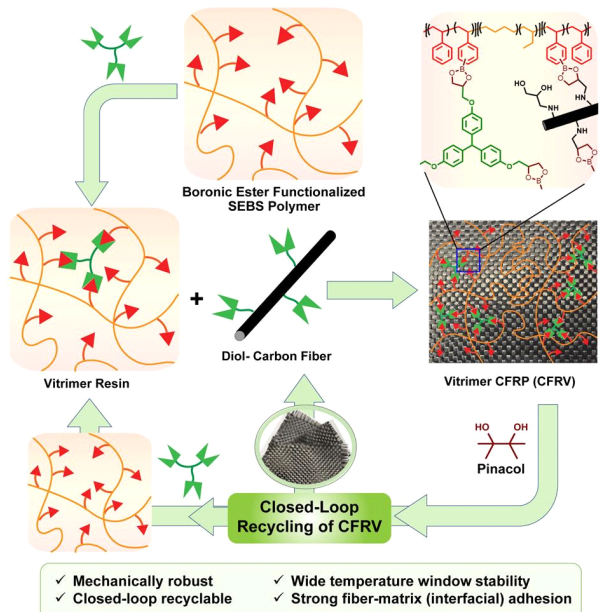


그림 14. 맞춤형 비트리머-섬유 인터페이스를 통해 뛰어난 계면 접착력을 가진 견고하고 재활용 가능한 탄소섬유 복합재.<sup>14</sup>



제시함으로써 환경적 지속 가능성을 높이는 중요한 성과로 평가된다.

최근 Saito 박사 연구팀은 vitrimer와 탄소섬유 복합소재를 결합하여, 기계적 강도와 재활용성을 동시에 극대화한 연구를 보고하였다.<sup>14</sup> 특히, 이 연구는 비트리머와 섬유 간의 계면 접착력을 개선하는 데 중점을 두었으며, 이를 통해 복합소재의 성능을 높이는 것을 목표로 하였다. 이종소재간의 계면 접착력을 향상시키기 위하여 비트리머와 탄소섬유 간의 맞춤형 인터페이스 설계를 통해, 두 재료 간의 계면 접착력을 강화하였다(그림 14). 기존 복합소재에서 계면 접착력의 약화는 기계적 성능 저하의 주요 원인이었지만, 이 연구에서는 특수 처리된 비트리머를 사용하여 탄소섬유와의 접착 강도를 크게 개선하였다. 이때 특수 처리된 비트리머란 보로닉 에스터(boronic ester) 기반의 동적 공유 결합으로 열에 의해 가역적으로 형성되고 깨질 수 있는 결합을 말한다. 이 결합은 탄소와 보론(B)의 결합을 통해, 외부 자극(특히 열)에 반응해 빠르게 재결합할 수 있는 성질을 갖추고 있다. 이 결합 구조는 가역적이기 때문에, 소재가 손상되거나 변형될 때 결합을 끊고 다시 형성하면서 자가치유 기능을 발휘한다.

또한, 연구 결과, 5회 이상의 재활용 사이클을 거친 후에도 기계적 성능이 85% 이상 유지되었으며, 이는 기존 비트리머 복합소재에 비해 성능 저하가 적은 점이 특징임을 확인하였다. 그리고 본 연구에서 개발된 복합소재는 높은 기계적 강도와 유연성을 유지하면서도, 반복적인 재활용과 자가치유가 가능한 특징을 보였다. 특히, 충격 저항성과 인장 강도에서 기존 복합소재 대비 15% 이상 향상된 성능을 보였, 고성능 응용 분야에서의 활용 가능성이 높아졌다(그림 15).

정리하면, 앞서 Tomonori Saito 연구팀에서 보고한 두 연구는 사용목적에 따라서 소재의 구조적 차이점을 이해할 수 있으며, 보로닉 에스터 결합은 주로 계면 접착력과 충격 저항성을 강화한 반면, Diels-Alder 기반은 재활용성과

자가치유 능력을 향상시키는 것으로 고찰할 수 있다.<sup>13, 14</sup>

### 3. 결론

최근 연구 사례들을 살펴보면 엔지니어링 플라스틱의 우수한 물성은 유지하면서 지속가능한 소재로의 구현과 이를 통한 환경문제의 해결까지 자원 순환 경제 모델을 만들고 있다. 이러한 혁신적인 연구자들의 노력과 실용화를 위한 연구개발은 지속가능한 엔지니어링 플라스틱이 성공적으로 자리 잡는데 그 토대를 마련함은 물론 환경 보호와 경제적 이익도 함께 도모할 수 있을 것으로 기대된다. 다만 이에 앞서 환경문제에 관한 소비자 인식 제고가 선행되어야 할 것이다.

### 참고문헌

1. H. Tadokoro, T. Yasumoto, S. Murahashi, and I. Nitta, *J. Polym. Sci.*, **44**, 266 (1960).
2. D. L. Richardson, *Development of an Improved Extravehicular Space Suit Thermal Insulation Final Report*, No. C-69743 (1968).
3. J. R. Gaier, M. A. Meador, K. J. Rogers, and B. H. Sheehy, in *39th International Conference on Environmental Systems (ICES)*, No. E-16958-1 (2009).
4. J. Kim, J. Fan, G. Petrossian, X. Zhou, P. Kateb, N. Gagnon-Lafrenais, and F. Cicoira, *Mater. Horizons*, **11**, 3548 (2024).
5. S. Zhang, and F. Cicoira, *Adv. Mater.*, **29**, 1703098 (2017).
6. Y. M. Ha, Y. N. Kim, Y. O. Kim, C. So, J. S. Lee, J. Kim, and Y. C. Jung, *Carbon Lett.*, **30**, 457 (2020).
7. Y. Kim, K. H. Nam, Y. C. Jung, and H. Han, *Compos. Part B: Eng.*, **203**, 108451 (2020).
8. Y. N. Kim, J. Lee, Y. O. Kim, J. Kim, H. Han, and Y. C. Jung, *Appl. Mater. Today*, **25**, 10122 (2021).
9. Y. N. Kim, J. Y. Jo, J. Park, J. Lee, J. Kim, D. Y. Jeon, H. Han, and Y. C. Jung, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **15**, 54923 (2023).
10. B. Wan, M. S. Zheng, X. Yang, X. Dong, Y. Li, Y. W. Mai, and J. W. Zha, *Energy Environ. Mater.*, **6**, e12427 (2023).
11. S. Wang, D. Fu, X. Wang, W. Pu, A. Martone, X. Lu, M. Lavorgna, Z. Wang, E. Amendola, and H. Xia, *J. Mater. Chem. A*, **9**, 4055 (2021).
12. S. Gu, Y. F. Xiao, S. H. Tan, B. W. Liu, D. M. Guo, Y. Z. Wang, and L. Chen, *Angew. Chem.*, **135**, e202312638 (2023).
13. Z. Zhou, S. Kim, C. C. Bowland, B. Li, N. Ghezawi, E. Lara-Curzio, A. Hassen, A. K. Naskar, M. A. Rahman, and T. Saito, *Cell Rep. Phys. Sci.*, **3**, 101036 (2022).
14. M. A. Rahman, M. S. Karunarathna, C. C. Bowland, G. Yang, C. Gainaru, B. Li, S. Kim, V. Chawla, N. Ghezawi, H. M. Meyer III, A. K. Naskar, D. Penumadu, A. P. Sokolov, and T. Saito, *Cell Rep. Phys. Sci.*, **4**, 101695 (2023).

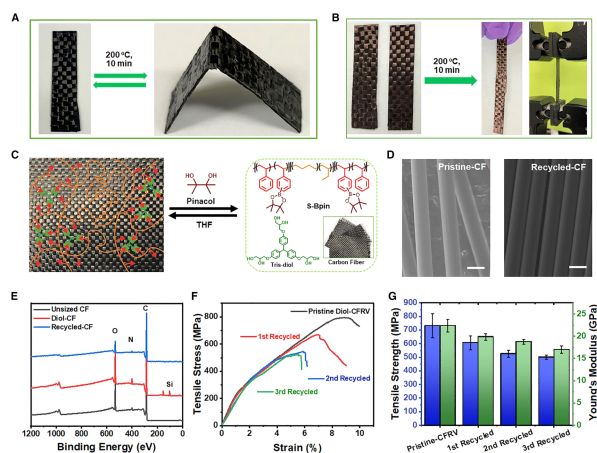


그림 15. 경화된 CFRV의 열성능 능력.<sup>14</sup>