

REVIEW

지속가능한 전자기기를 위한 선택적 탈착 점/접착제 기술 동향

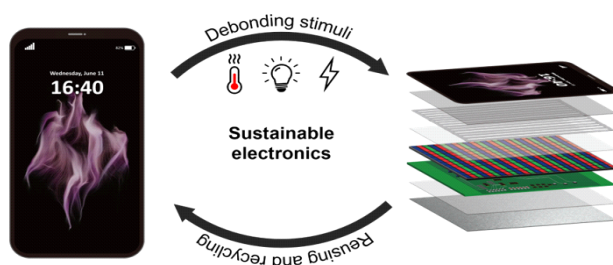
김대환, 권민상*

서울대학교 재료공학부, 신소재공동연구소

Stimuli-Responsive Debondable Adhesive for Sustainable Electronics

Daewhan Kim, Minsang Kwon*

Department of Material Science and Engineering, Research Institute of Advanced Materials,
Seoul National University, Seoul, Korea



ABSTRACT

The increasing demand for electronic devices such as smartphones, tablets, and laptops has significantly intensified the generation of electronic waste. This waste stream includes not only valuable materials like precious metals and engineered plastics, but also hazardous substances that pose serious risks to the environment and human health. To address this growing issue, recycling and reuse of electronic components have gained importance as essential strategies for promoting resource efficiency and sustainability. However, one of the main challenges in device disassembly is the widespread use of strong adhesives that bond internal components tightly, especially within multilayered structures. These adhesives hinder clean separation and reduce the recovery rate of reusable materials. In recent years, debondable adhesive technologies that respond to external stimuli such as heat, light, electricity, and other physical or chemical triggers have attracted significant interest. These systems allow for selective and damage-free detachment of components, improving both environmental and economic outcomes. This review introduces recent advances in stimulus-responsive debondable adhesives, including photo, thermal, electrical, magnetic, solvent-based, ultrasonic, and bioinspired systems. These approaches offer promising pathways toward cleaner and more efficient disassembly, which is essential for building a circular and sustainable electronics industry.

Key Words: Electronic device recycling, Debondable adhesives, External stimuli, On-demand release, Sustainable electronics recycling

*Correspondence: minsang@snu.ac.kr



1. 서론

전자 폐기물(E-waste)은 스마트폰, 태블릿, 노트북 등 전자기기들의 수요 급증으로 2022년 한 해에만 약 6,200만 톤이 발생한 것으로 추정되며, 2030년에는 8,200만 톤을 넘어설 전망이다[1]. 전자기기에는 금, 구리 등 유가자원을 비롯하여 중금속, 브롬화난연제 등 유해물질도 다량 포함되어 있어 환경과 건강에 다양한 문제를 야기한다[2]. 특히, 전자 폐기물을 부적절하게 처분하거나 소각할 경우 토양, 지하수 오염과 유독가스 발생, 더 나아가 노동자들의 신경계 손상이나 호흡기 질환 등의 심각한 건강 문제를 유발할 수 있다[3]. 이러한 이유로 전자 폐기물 발생을 최소화하고 자원 순환을 극대화하기 위한 전자기기 재활용 및 재사용 기술의 중요성이 강조되고 있다.

전자기기 폐기물 감소를 위해서는 크게 두 가지 방법으로 접근이 가능하다. 첫째, 더 이상 사용 불가능한 기기로부터 금속, 플라스틱 등의 소재를 추출하여 재활용하는 방법이며, 두번째로는 고장난 특정 부품만을 선별적으로 제거, 교체하여 정상적으로 사용 가능한 디스플레이 패널, 초박막 유리(ultra thin glass) 등 고부가가치 소재를 회수하여 재사용하는 방법이다. 이러한 부품 재활용과 재사용은 원자재 수요를 줄이고 제조 비용 절감 및 자원 효율 향상에 기여함으로써 환경적, 경제적 이점을 모두 제공한다. 따라서, 효율적인 재활용 및 재사용 전략은 지속 가능한 사회 실현을 위한 핵심 과제가 되었다.

그러나 현재 전자기기의 분해를 어렵게 만드는 주요한 문제는, 내부 부품들이 강력한 접착제 또는 접착제 (이하 접착제)로 결합되어 있다는 점이다[4]. 특히 전자기기에 적용되는 다층 구조(multi-layered structure)내에서는 접착제를 통해 부품들이 견고하게 결합되어 있어, 물리적인 힘만으로는 손상 없이 분리하기 어렵다. 이로 인해 고부가가치 소재의 회수율이 저하될 수 있으며, 이는 전자 폐기물의 효율적

인 재사용에 부정적인 영향을 미친다.

이러한 문제 해결을 위해 최근 주목 받고 있는 기술이 바로 선택적(on-demand)으로 외부 자극에 의해 점/접착력(이하 접착력)을 감소시킬 수 있는 탈착형(debondable) 접착제 기술이다[5]. 해당 기술은 기판 간의 결합을 깨끗하게 분리시켜 정교한 내부 전자 구조에 손상을 주지 않으며, 전자 폐기물 저감과 생산 비용 절감에 효과적이다. 따라서 손상 없이 효율적인 분리를 가능하게 하는 기술은 전자 폐기물 처리에 따른 환경적, 경제적 부담을 줄이기 위한 핵심 연구 분야로 주목받고 있다. 본 리뷰는 본 연구팀이 2025년 Material Horizons에 게재한 opinion article을 기반으로 내용을 보완하여 재작성한 것으로, 부품 분리에 적용 가능한 선택적 탈착형 접착제 기술을 다양한 외부 자극 기반으로 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1. 전자기기에 사용되는 접착제의 특성과 기존 탈착 전략

현재 연구되고 있는 선택적 탈착형 접착제는, 평상시 일반 접착력을 유지하다 특정 외부 자극을 가하면 접착력이 급격히 감소되어 잔여물 없이 쉽게 분리될 수 있도록 연구되고 있다. 최근의 전자기기에는 경량화를 위해 얇고 가벼운 소재가 다층 구조로 적층되어 있으며, 다양한 기능과 재질의 부품들을 안정적으로 고정하기 위한 높은 접착 강도(adhesion strength)를 요구한다. 또한, 전자기기의 종류에 따라 접착제에 요구되는 물성이 상이한데, 광학적 투명성(optical clearance), 전기 절연성(insulation) 혹은 전기 전도(conductivity), 응력 완화(stress relaxation) 등의 특성이 선택적으로 필요할 수 있다[6-9]. 이처럼 전자기기용 접착제는 단순한 부착 수단을 넘어, 제품의 기능과 성능 유지에 있어 필수적인 구성요소로 작용한다. 따라서 전자기기의 재활용 및 재사용을 실현하기 위해서는 이



러한 물성을 유지하면서도, 외부 자극에 의해 손상 없이 용이하게 분리될 수 있는 접착 기술이 필수적으로 요구된다.

하지만 현재 널리 사용되고 있는 에폭시계(epoxy) 및 아크릴계(acrylic) 접착제는 불활성(inert) C-C 결합을 주 골격으로 하여, 우수한 내열성 및 화학적 안정성을 갖고 있다[10]. 이러한 특성은 극한 환경에서도 신뢰성을 확보하는데 유리하나, 재활용의 관점에서는 부품 분리를 어렵게 만드는 주요 요인으로 작용한다. 이에 따라 일부 연구에서는 140°C 이상의 고온에서 트랜스에스터화(transesterification) 반응을 유도하여, 인쇄 회로기판(PCB, printed circuit board)에서 접착제를 제거하는 방식이 제안되기도 하였다. 그러나 이 방식은 특정 단일층 분리에는 효과적일 수 있으나, 복잡한 다층 전자소자를 완전하게 분해하기에는 한계가 존재한다.

현재 기판 간의 분리를 위한 일반적인 방법으로는 1) 가열을 통해 접착제의 점도를 저하시키는 열가소화 방식, 2) 칼이나 와이어를 이용한 물리적 제거 방식, 3) 용매에 의한 화학적 용해 방식 등이 있다[5]. 그러나 고온 방식은 높은 에너지 소비를 유발할 뿐만 아니라, 디스플레이, 배터리, 태양전지 등 열에 민감한 소자가 포함된 구조에서는 소자 손상의 위험이 크다. 예를 들어, 디스플레이 모듈 내의 컬러 필터(color filter)나 OLED 층은 약 100°C 이상의 온도에서 열 표백(thermal bleaching) 현상이 발생할 수 있으며[11,12], 리튬이온 배터리는 과도한 열 축적 시 폭발 위험이 존재한다[13]. 또한, 물리적 제거 방식은 기판 손상 가능성이 높고, 용매를 활용한 화학적 제거는 환경에 대한 부하가 크며, 기판의 부식 문제를 유발할 수 있다. 무엇보다 이러한 기존 방식들은 접착제가 잔류하는 경우가 많아, 재활용 부품의 품질 저하 및 재조립 시 불량률의 원인이 될 수 있다. 따라서, 이러한 열적, 화학적 한계를 극복하기 위한 대안으로, 저자극 조건에서도 선택

적으로 분리가 가능한 탈착 기술 개발이 활발히 진행되고 있다.

2.2. 광 반응형 탈착성 접착제(Photo-Debondable Adhesive)

광 반응형 탈착성 접착제는 다양한 파장대의 광원을 활용하여 접착력을 제어하는 방식으로, 비접촉 외부 자극, 시간 및 공간적 제어의 정밀성, 빠른 반응 속도 등의 이점을 바탕으로 주목받고 있는 선택적 탈착 기술 중 하나다. 자외선(UV)이나 가시광선과 같은 광 자극은 파장, 세기, 조사 시간 등을 정밀하게 조절할 수 있어, 감도가 높은 전자 부품에 손상을 최소화하면서도 접착 강도를 제어할 수 있는 이상적인 방법으로 간주된다.

이러한 접착제는 광 자극에 반응하여 다양한 메커니즘으로 탈착성을 구현한다. 1) 고분자 사슬 절단(chain scission) 메커니즘은 광 조사에 의해 고분자의 주 사슬이 절단되면서 분자량이 감소하고 접착력이 약화되는 방식이다(Fig. 1(a))[14]. 2) 이성질체화(isomerization) 기반 메커니즘은 광에 의해 분자 구조가 이성질체로 전환되면서 고분자 간 상호작용이 달라지고, 이로 인해 응집력이 저하되어 탈착이 유도된다(Fig. 1(b)) [15,16]. 3) 가교도(crosslinking density) 증가를 통한 방식은 광 자극에 따라 가교도가 변화하며 접착력이나 응집력이 조절되는 것으로, 특히 분리 시 잔류물 없이 제거될 수 있는 응집력 강화가 가능하다(Fig. 1(c))[17]. 이 중 사슬 절단이나 이성질체화 기반 시스템은 접착력 감소에는 효과적이지만, 고분자 구조의 붕괴로 인해 고체에서 액체로 상변화가 발생할 경우 접착제가 인접한 부품에 번지며 오염을 유발할 수 있다는 단점이 있다. 이에 따라 전자기기 응용에서는 광 조사에 의해 접착제의 내부 가교도를 증가시켜 응집력을 강화한 후, 분리 시 잔류물 없이 깨끗하게 제거할 수 있는 방식이 보다 적합한 것으로 여겨진다. 이러한

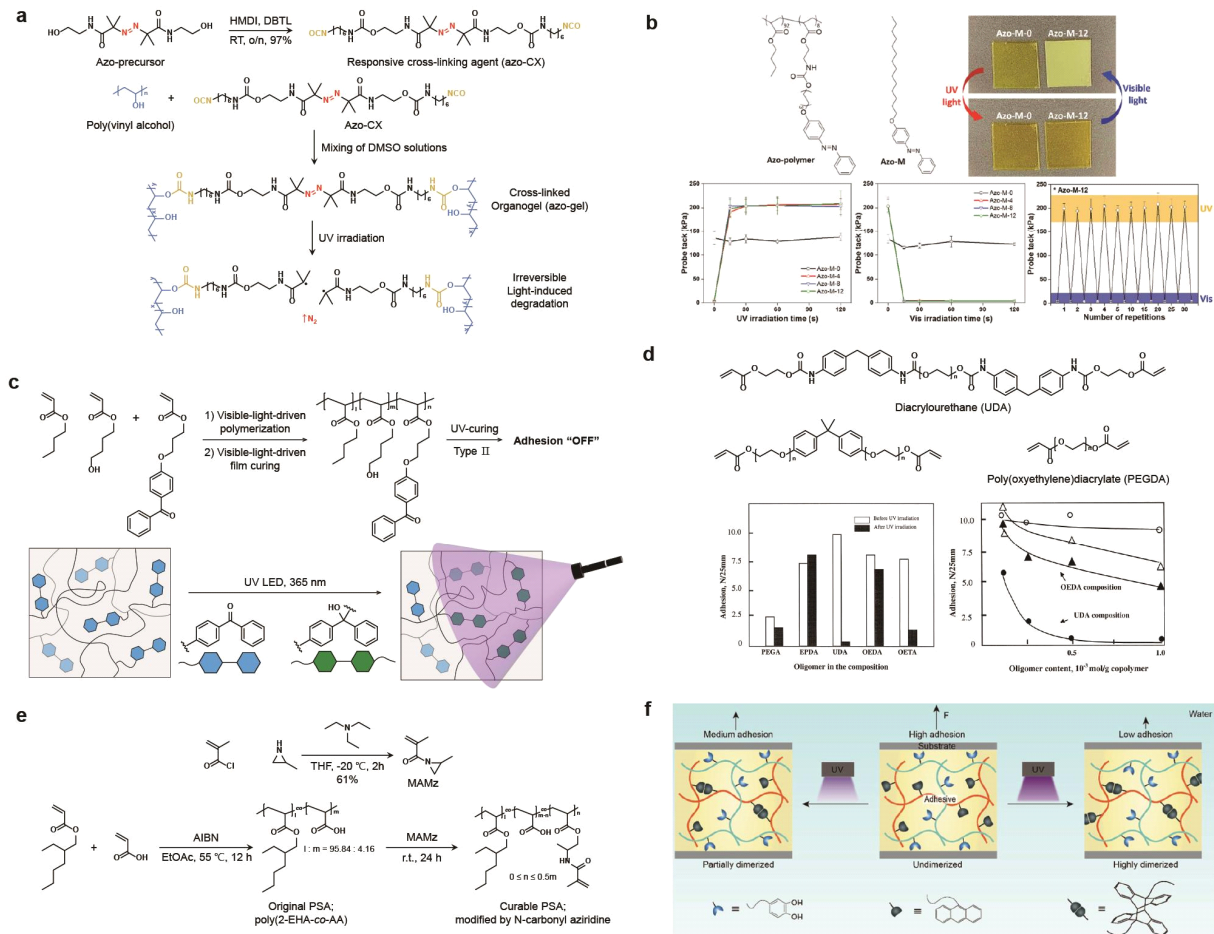


Fig. 1. Photo-debondable adhesive mechanism includes: (a) Reduction of adhesion strength via polymer chain scission induced by photo-curing. (b) Phase transition triggered by molecular structural changes through photo-induced isomerization. Reprinted with permission [16]. Copyright 2021, American Chemical Society. (c) Debonding through increased crosslinking density by incorporating UV-responsive functional groups. Reprinted with permission [17]. Copyright 2024, Wiley-VCH GmbH. (d) Adhesive formulation using diacrylate oligomers and multi-functional crosslinkers to enable light-triggered crosslinking. Reprinted with permission [22]. Copyright 2003, Wiley Periodicals, Inc. (e) Introduction of additional crosslinking sites by post-modification of $-\text{COOH}$ groups with acrylates. (f) Reduction of adhesion via reversible anthracene dimerization, which increases cohesion upon UV exposure. Reprinted with permission [25]. Copyright 2021, American Chemical Society.

원리는 실제로 반도체 웨이퍼 공정에 사용되는 다이싱 테이프(dicing tape)에 이미 적용되고 있으며, 최근에는 마이크로 LED나 그래핀 기반 2차원 소재의 전사 공정 등 다양한 고정밀 응용 분야에서도 유망한 기술로 평가받고 있다[18,19].

가교도 증가를 활용한 광 반응형 탈착성 접착제는 과경화(overcuring)에 따른 물성 변화에 기반한 방식이다. 관련 연구에 따르면, 과경화 과정에서 발생하는 수축(shrinkage)은 표면 거칠기(roughness)를 증가시키며[20,21], 분자 시뮬레이션(MD simulation)



결과에서는 응집력이 증가할수록 고분자 사슬이 늘어짐 없이 계면으로 응력이 집중되어, 탈착이 용이해지는 것으로 보고된 바 있다[17]. 이러한 과정을 유도하기 위해서는, 우선 접착제로서의 기본 기능을 수행할 수 있는 고분자 네트워크를 설계한 후, 광 반응성 기능기를 도입하여 추가적인 가교 반응을 유도하는 방식이 필요하다.

예를 들어, polyethylene glycol(PEG), 우레탄, 에폭시 등의 고분자 기반 물질에 diacrylate기를 양 말단에 도입한 올리고머(oligomer)와 다관능성 가교제(multi-functional crosslinker)를 함께 포함하는 접착제 시스템이 제안된 바 있다. 이 시스템은 UV 조사 시 diacrylate와 가교제 간 추가적인 가교 반응을 통해 응집력을 증가시키며, 결과적으로 접착력을 저하시킬 수 있다(Fig. 1(d))[22,23]. 또 다른 접근법으로는 -COOH기를 포함한 acrylic acid(AA) 단량체를 활용하여 polyacrylate 고분자를 형성한 후, glycidyl methacrylate (GMA)와 반응시켜 추가적인 가교점을 도입하는 post-modification 방식이 있으며, 이 역시 광 반응을 기반으로 한 탈착 제어에 유효한 것으로 보고되었다(Fig. 1(e))[24].

최근에는 공정 단순화와 반응 효율 향상을 위해 광 반응성 기능기를 단량체에 직접 도입하여 접착제를 제조하는 방식이 선호되고 있다. 대표적인 예로 benzophenone 기반 단량체는 Norrish Type II 반응을 통해 잔여물 없이 탈착이 가능한 구조를 형성하며, 이는 광 투명성을 유지한 채 디스플레이 패널과 커버글라스를 쉽게 분리할 수 있는 reworkable 접착제로 활용된다[17]. 해당 접착제는 폴더블 디스플레이에 요구되는 folding test 또한 성공적으로 통과하여, 실제 응용 가능성을 입증하였다.

한편, benzophenone 대신 가역적인 결합 특성을 지닌 기능기인 anthracene이나 coumarin을 도입할 경우, 자외선 파장에 따라 접착력을 조절할 수 있는 시스템도 구현 가능하다(Fig. 1(f))[25,26]. 예를 들어, an-

thracene은 365 nm의 자외선 조사 시 Diels-Alder 반응을 통해 이합체(dimer)를 형성하며 응집력을 증가시켜 탈착이 유도되며, 반대로 254 nm에서 이합체가 해리되면서 접착력이 다시 증가한다. Coumarin의 경우에도 365 nm에서 [2+2] 사이클화 반응을 통해 결합이 형성되고, 254 nm 조사 시 이합체가 분리되면서 접착력이 저해된다. 이러한 시스템은 적절한 파장의 선택을 통해 접착제의 상태를 가역적으로 제어할 수 있는 특징을 지닌다.

결론적으로, 광 반응형 탈착성 접착제는 빠른 탈착 가능성, 공정 제어의 용이성, 전자기기 손상의 최소화 등 여러 이점을 바탕으로 다층 구조를 가지는 전자 부품의 정밀 분해에 적합한 기술로 평가된다. 다만, 광 자극이 접착제 층에 도달해야 하므로 최소한 한쪽 기판은 광 투과성이 확보되어야 하며, 또한 인접 부품이 자외선에 민감할 경우에는 적용이 제한될 수 있는 구조적 제약이 존재한다.

2.3. 열 반응형 탈착성 접착제(Thermally Debondable Adhesive)

열을 이용한 탈착 방식은 광 반응 기반 기술과 함께 가장 널리 연구되어 온 실용적인 접착 분해 방식 중 하나로, 열 반응형 탈착성 접착제는 특정 온도 범위에서 접착력이 저하되도록 설계되어 있다. 구조용 접착제 등 비교적 고온에 민감하지 않은 응용 분야에서는 동적 공유 결합(dynamic covalent bonding) 방식으로 접착제의 재가공 가능성을 높이는 방식으로 가역적 접착력이 연구되어 왔다[27]. 그러나 전자 기기 재활용을 위한 응용에서는 고온이 민감한 전자 부품이 포함되어 있을 가능성이 높기 때문에, 상대적으로 낮은 온도에서도 손상 없이 깔끔하게 접착제를 제거할 수 있는 기술이 요구된다. 이러한 요구에 따라 다양한 메커니즘 기반의 열 반응형 접착제가 제안되고 있다. 한 가지 접근 방식으로는, 접착제 내부에 peroxides[28] 혹은 azo

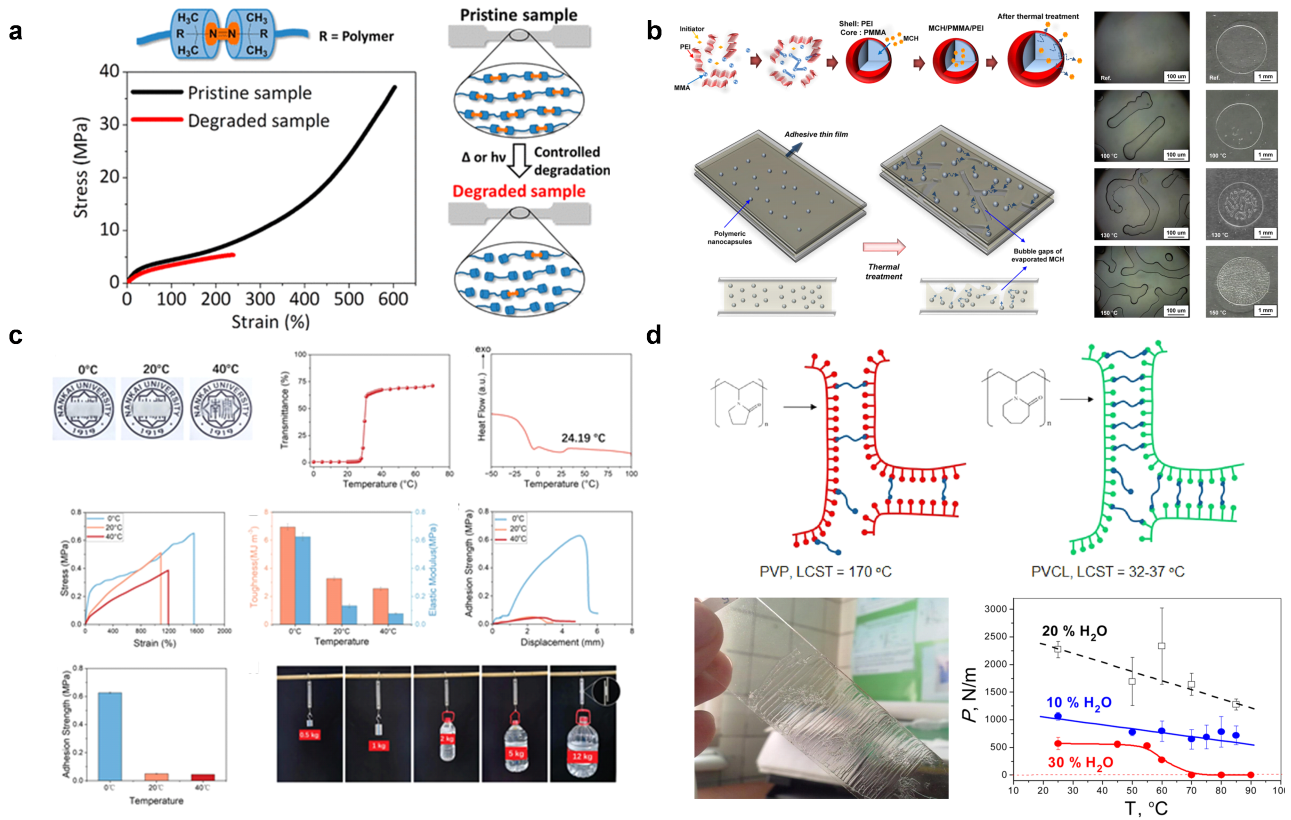


Fig. 2. Thermally debondable adhesives. (a) Cleavable azo groups are introduced to enable thermal decomposition upon heating. Reprinted with permission [29]. Copyright 2016, American Chemical Society. (b) Thermally activated organic additives induce gas formation through evaporation or decomposition, generating interfacial bubbles that reduce adhesion. Reprinted with permission [31]. Copyright 2018, Wiley Periodicals, Inc. (c) UCST-type hydrogels exhibit temperature-responsive debonding behavior upon heating beyond the critical temperature. Reprinted with permission [34]. Copyright 2024, Wiley-VCH GmbH under a CC BY 4.0 license. (d) LCST-type systems undergo phase separation at elevated temperatures, weakening interfacial adhesion and promoting detachment. Reprinted with permission [35]. Copyright 2024, American Chemical Society.

group[29] 등이 활용된다(Fig. 2(a)). 이러한 작용기들은 특정 온도 이상에서 고분자 사슬의 절단(cleavage)을 유도하며, 고분자 네트워크가 분해되면 가교도가 낮아지고 응집력이 저하되어, 결과적으로 탈착이 유도된다[30].

또 다른 방식은 접착제와 기판 간의 계면에서 계면 물리적 변화를 통해 접착력을 약화시키는 전략으로, 열 자극에 의해 활성화되는 첨가제(additive)를 활용하는 기술이다(Fig. 2(b)). 접착제 내에 열에

의해 분해되거나 기화되는 유기 첨가제를 포함시킬 경우, 생성된 가스가 계면으로 확산되어 기포(bubble)를 형성하게 된다. 이러한 기포는 물리적인 간격을 형성하여 접착 계면의 응집력을 약화시키며, 결과적으로 탈착을 유도하게 된다. 예를 들어, Polymethylmethacrylate(PMMA) / polyethyleneimine(PEI) 기반의 고분자 나노캡슐 내에 휘발성 용매인 methylcyclohexane (MCH)을 포함하면, 열 처리 시 MCH가 기화되어 계면에 기포를 형성함으로써 접착력을 효과적으



로 조절할 수 있다. 이 때 첨가제의 농도 및 열처리 조건을 조절함으로써 탈착 성능을 정밀하게 조정할 수 있다[31].

이와 더불어, 상전이(phase transition) 거동을 이용한 하이드로젤 기반 접착제에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 하이드로젤 재료를 기반으로 한 debondable adhesive는 flexible, soft한 전자기기 분야에서 활용 가능성이 높으며, 특히 고분자의 온도 변화에 따른 용해 상태나 상 분리 여부가 달라지는 UCST(upper critical solution temperature) 및 LCST(lower critical solution temperature) 시스템을 이용해 제작된다[32,33].

UCST 기반 접착제는 특정 온도 이하에서 고분자 간 상호작용이 증가하여 응집 상태로 전환되며 접착력이 높아지고, 반대로 온도가 상승하여 UCST를 초과하면 고분자가 공용매(co-solvent)에 용해되어 분산되며 접착력이 현저히 감소한다. 예를 들어, poly(benzyl acrylate)(PBnA)와 menthol:thymol 공용매 시스템을 활용한 접착제는 저온에서 응집력이 형성되어 접착이 유도되며, 온도 상승 시 고분자가 분산되어 자연스럽게 탈착이 일어난다(Fig. 2(c))[34]. 한편 LCST 기반 접착제는 상온에서는 균일한 혼합 상태를 유지하며 강한 접착력을 발휘하지만, 온도가 특정 임계점 이상으로 상승하면 고분자 사슬 간 수소결합이 약화되고 소수성 상호작용이 강화되며 상 분리가 유도되어 접착력이 저하된다. 예를 들어, poly(N-isopropylacrylamide)(PNIPAm) 또는 poly(N-vinyl caprolactam)(PVCL)에 친수성 기능기를 지닌 PEG를 포함시켜 제작한 접착제는 LCST 부근에서 수소결합의 파괴와 함께 상분리를 일으키고, 이로 인해 응집력이 감소하며 탈착이 유도된다(Fig. 2(d))[35,36]. 이러한 방식은 비교적 낮은 35~50°C의 온도 범위에서 탈착이 가능하다는 장점이 있다.

그 외에도 biphenyl ester기를 포함한 액정성(liquid crystal) 코어가 80°C 부근에서 등방성 상태로 전이되며

탈착되는 접착제[37]와 pyrrole and alkyl diene group의 [4+2] Diels-Alder 반응으로 가교된 상태의 접착제가 135°C에서 고리 연결이 끊기며 접착력이 감소되는 등의 메커니즘을 활용한 열 반응 접착제가 제안되고 있다[38]. 이와 같은 열 응답형 접착제는 광 투과성 기판의 유무에 관계없이 적용할 수 있으며, 오븐이나 핫플레이트와 같은 비교적 단순한 장비를 통해 구현 가능하다는 장점이 있다. 다만, 발열체의 부착 또는 국소 가열 방식 등은 제품 설계 초기 단계에서 함께 고려되어야 하며, 접착제의 내열성 및 반복 사용에 따른 장기적 신뢰성 확보 또한 필수적으로 검토되어야 한다.

2.4. 전기 반응형 탈착성 접착제(Electrically Debondable Adhesives)

전기 자극 기반 탈착성 접착제는 직류(DC) 전압을 인가하여 접착력을 감소시키는 기술로, 신속성, 국소적 제어, 낮은 열 충격, 그리고 반복 사용 가능성 등의 장점으로 인해 지속적인 연구가 진행되고 있다. 현재 아크릴, 에폭시, 우레탄 소재 등 다양한 고분자 접착제에 적용 가능하며, 실제로 고속 항공기 부품의 탈부착, 전기차 배터리 분리, 스마트폰 배터리 셀 분해 등의 실증 사례도 보고된 바 있다. 전기 자극에 의해 접착력이 저하되는 메커니즘은 크게 1) 계면 전기화학 반응과 2) 내부 구조 붕괴 기반으로 제시되고 있다.

계면 전기화학 반응 기반 시스템은 접착제에 포함된 이온성 액체(ionic liquids)의 이동성을 활용하여 전극과 접착 계면 사이에 전기화학 반응을 유도하고, 이때 생성되는 금속 수산화물($Me(OH)_n$) 또는 기체 거품이 물리적 격차를 형성함으로써 탈착이 유도되는 방식이다(Fig. 3(a))[39,40]. 대표적으로, imidazolium 계열의 [EMIM]TFSI 혹은 [BMIM]TFSI 등 이온성 액체가 도입된 에폭시 접착제는 60~90 V 이하의 전압에서 수 초에서 1분 이내에 100% 탈착이 가능하며, 초기 접착력은 12~20 MPa에 달하는 것으로 보고되었다

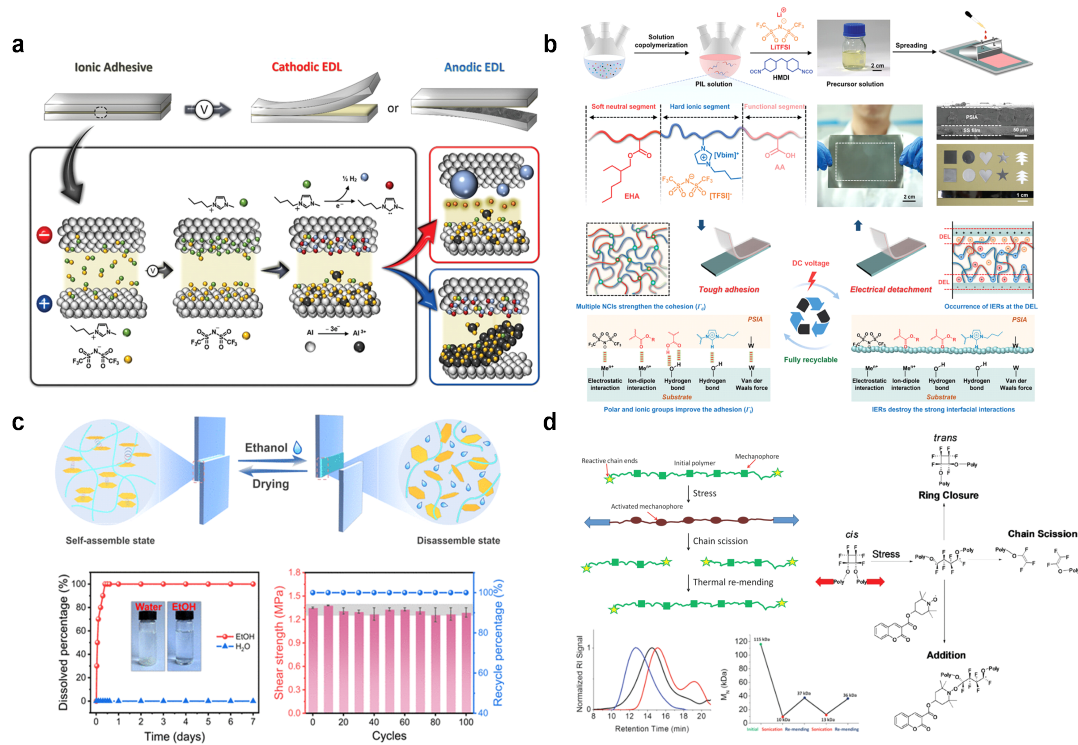


Fig. 3. Electrically and magnetically debondable adhesives. (a) Schematic diagram of electrochemical reactions at the anode and cathode under electrical stimulation. Reprinted with permission [39]. Copyright 2021, Wiley-VCH GmbH, Licensed under CC BY 4.0. (b) Debonding based on internal structural collapse involving ionic monomers. Reprinted with permission [43]. Copyright 2025, Wiley-VCH GmbH. (c) Solvent-induced debonding based on the selective solubility of adhesives in specific solvents [46]. Copyright 2022, American Association for the Advancement of Science, Licensed under CC BY 4.0. (d) Ultrasound irradiation enables a potential debonding mechanism by selectively cleaving bonds through mechanically triggered cycloreversion. Copyright 2011, American Chemical Society [50].

[40,41]. 이들 접착제는 전극 구조 및 기판 재질에 따라 탈착 효율이 달라지며, 이온의 농도, 점도 및 계면의 전기화학 반응 속도에 따라 최적 조건이 형성된다.

내부 구조 붕괴 기반 시스템은 접착 계면보다는 접착제 자체의 내부 네트워크 구조에 초점을 맞춘다. 이 경우, poly(ionic liquid) 기반 고분자 혹은 액체 누출이 없는 고체형 이온 도전 재료를 활용하며, 전기 자극에 따라 이온의 분극 또는 전하 재배열이 발생하고, 이로 인해 electrostatic interaction, lithium bonding, ion-dipole interaction 등 내부의 다중 비공유결합(inter-

molecular non-covalent interactions)이 붕괴되어 접착제가 빠르게 응집력이 약화되거나 접착 계면에서 분리된다(Fig. 3(b))[42]. 이러한 구조는 기계적 강도와 신뢰성을 유지하면서도, 반복적인 탈착 및 재사용이 가능한 구조로 설계가 가능하다. 이를 사용한 liquid-free poly(ionic liquid) ionoadhesive는 다양한 방향성 결합을 활용한 나노 상분리(nanophase separation) 구조를 통해 높은 기계적 안정성과 빠른 전기 응답성을 동시에 구현하였으며, 이후 추가로 연구되어 개발된 테이프 형태의 접착제는 90 V 이하에서 1분 이내 탈착이 가능한 고기능성 기술로 발전되고 있다[43].



본 시스템은 전극의 위치, 인가 전압의 크기, 적용 시간 등을 정밀하게 조절함으로써 실시간 분해 제어가 가능하다는 장점이 있으나, 이를 위해서는 전극 구조에 대한 별도의 설계가 요구되며, 기판과 접착제 간에 발생하는 전기화학 반응 조건 또한 사전에 면밀히 고려되어야 한다. 아울러, 전기 자극이 효과적으로 전달되기 위해서는 도전성 금속 기판의 사용이 전제되어야 하므로, PET나 유리와 같은 절연성 재료에는 적용이 어렵다는 구조적 제약이 따른다.

2.5. 기타 자극 반응형 탈착성 접착제

열, 광, 전기와 같은 특정 에너지 자극을 이용한 탈착성 접착제 외에도, 자기장, 용매, 초음파 등 다양한 물리적 및 화학적 자극을 활용하여 접착력을 저하시키는 접근 방식에 대한 연구도 지속적으로 이루어지고 있다. 대표적인 예로, 자기 반응형 탈착성 접착제는 접착층 내에 iron particle과 같은 강자성 입자를 내장하여 외부 자기장에 반응하도록 설계되며, 수 초 이내의 매우 빠른 탈착이 가능하고, 여러 차례의 부착-탈착 사이클 후에도 접착 성능이 유지되는 가역적 접착 시스템으로 구현될 수 있음이 보고되었다 [44,45]. 이러한 자기장 기반 기술은 미세 패턴을 이용한 실리콘 웨이퍼 전사 공정 등 국소적인 마이크로/나노 스케일 응용에는 효과적일 수 있으나, 일반 전자기기의 분해 공정에 적용하기에는 주변의 PCB 회로나 TFT(thin film transistor) 소자와 같은 민감한 부품에 전자기 간섭을 유발할 수 있으며, 접착층의 광 투과성을 저해하는 한계로 인해 실용화에는 제약이 따른다.

용매 유도 탈착성 접착제는 접착제 성분이 특정 용매에 선택적으로 용해되거나 팽윤되는 특성을 활용하여, 외부 용매 처리만으로도 접합 부위를 손쉽게 분리할 수 있도록 설계된다(Fig. 3(c))[46]. 이러한 화학적 접근은 비교적 온건한 조건에서 접착제의 가역적 조립과 해체를 가능하게 한다는 장점이 있으나, 전자 부품

분해 공정에 유기 용매를 도입할 경우 구성 소재의 팽윤(swelling)이나 손상을 초래할 수 있으며, 용매의 사용 및 폐기와 관련된 환경적 부담 또한 크다는 단점이 있다. 이에 따라, 용매 기반 탈착 기술은 개념 검증 수준의 연구는 다수 존재하나, 전자기기의 실제 분해 공정에 적용되기 위해서는 해결해야 할 기술적 과제가 많다.

외부 자극으로 초음파를 활용하는 탈착 방법도 제안된 바 있다. 예를 들어, 초음파 조사에 의해 접착제 내부에 포함된 thermal acid generator를 담지한 마이크로 캡슐(micro capsule)이 손상되면서 산이 방출되고, 방출된 산이 산 분해성 폴리우레탄의 주사슬을 절단하여 접착력을 크게 감소시키는 메커니즘이 보고되었다(Fig. 3(d))[47]. 또 다른 연구에서는, 초음파로 유도된 기계적 자극이 고분자 내 특정 결합에 기계적 응력을 집중시켜 선택적인 사슬 절단을 유도하고, 이후 열처리를 통해 구조가 복원되는 가역적 시스템도 제안된 바 있다[48]. 이러한 연구들은 초음파를 통해 고분자 구조 내 결합을 선택적으로 조절함으로써 접착력을 제어할 수 있음을 시사하지만, 초음파 진동 에너지가 접합부에 전달될 경우 얇은 박막이나 미세 전자소자에 손상을 유발할 수 있으며, 실제 전자기기 분해를 위한 초음파 기반 기술의 적용 사례는 아직 제한적이기 때문에 그 실용성을 검증하기 위한 추가 연구가 요구된다.

최근에는 체온 등의 특정 온도나 pH, 습도 변화에 반응하여 접착력이 조절되는 생체 모사 접착제 시스템도 소개되고 있다[49]. 이러한 시스템은 광, 전기 등 인공 자극이 아닌 자연 환경 또는 생리적 자극에 기반하여 탈착을 유도하며, 저온 반응성 하이드로젤이나 pH 민감성 고분자 네트워크와 유사한 메커니즘을 따른다. 해당 기술은 일회용 전자기기, 바이오 센서, 유연 전자기기 등 체온, 체액 등에 의해 접착 특성이 변화하며 자율 분해 또는 탈착이 가능한 생분해성 생체 모사 접착제가 보고되었으며, 이는 기존 자극 반응형 접착 기



술의 새로운 진화 형태로 제시되고 있다.

3. 결론 및 전망

최근 전자기기의 효율적인 재활용을 목표로 자극 반응형 탈착성 접착제가 적극적으로 연구되고 있다. 특히 열, 광, 전기 등의 자극을 활용한 기술들은 신속하고 정밀한 접합부의 해체가 가능해졌으며, 실제 상용화가 이루어질 정도로 발전하였다. 그러나 열 자극 기술은 기기의 열 손상 위험과 정밀한 온도 제어의 어려움을 동반하고, 광 자극 기술은 기판의 투명성 요구나 고강도 자외선 조사에 의한 주변 부품 손상 가능성 등의 한계를 지닌다. 따라서 자기장, 초음파, 전기 등 다른 외부 자극을 활용한 탈착성 접착 기술이 보다 폭넓게 연구되어야 하며, 각 기술 간의 상호 보완을 통해 더욱 효율적이고 정밀한 접합 해체 수단을 확보하는 것이 필수적이다. 이와 함께 전자기기 구성 소재와 접착제 사이의 호환성 향상, 적용 가능한 자극의 다양화, 보다 낮은 에너지 조건에서도 빠른 응답성을 보일 수 있는 새로운 고분자 설계 연구도 함께 이루어져야 할 것이다. 또한 접착제 탈착 후 잔여물이 전혀 남지 않는 특성을 유지하면서도, 접착제 자체가 환경에 부담을 주지 않고 분해되거나 쉽게 재활용될 수 있는 지속가능한 소재 접근도 반드시 병행되어야 한다. 궁극적으로는 탈착의 효율성과 정밀성, 그리고 접착제의 친환경성까지 모두 아우르는 통합적이고 균형 잡힌 기술 개발이 향후 전자 폐기물 문제 해결과 지속 가능한 전자 산업 구축을 위한 필수 과제가 될 것으로 전망된다.

기호설명

PCB: Printed circuit board
OLED: Organic light-emitting diode
LED: Light-emitting diode
PEG: Polyethylene glycol

AA: Acrylic acid
GMA: Glycidyl methacrylate
MCH: Methylcyclohexane
UCST: Upper critical solution temperature
LCST: Lower critical solution temperature
PBnA: Poly(benzyl acrylate)
PNIPAm: Poly(N-isopropylacrylamide)
PVCL: Poly(N-vinyl caprolactam)
DC: Direct current
PET: Polyethylene terephthalate
TFT: Thin film transistor

ACKNOWLEDGMENTS

Author Contributions

MSK and DK drafted the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Funding

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00354184).

Declarations of Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests.

AUTHORS



권민상
2002~2006년: 서울대학교 재료공학부 화학부 학사
2009~2011년: 서울대학교 화학부 박사
2011~2013년: 서울대학교 재료공학부 박사 후 연구원
2013~2016년: University of Michigan



재료공학부 박사 후 연구원

2016~2020년: UNIST 재료공학부 조교수

2020~2022년: 서울대학교 재료공학부 조교수

2022~현재: 서울대학교 재료공학부 부교수

[관심분야] Organic and polymer materials, Sustainable materials, Functional materials



김대환

2014~2020년: University of Minnesota
화학부 학사

2021~2023년: 서울대학교 재료공학부
석사

2024~현재: 서울대학교 재료공학부 박
사과정

[관심분야] Functional polymer materials, Adhesive, Sustainable polymer

REFERENCES

- [1] World Health Organization, Electronic waste (e-waste), WHO, [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electronic-waste-\(e-waste\)#:~:text=E,waste%20were%20produced](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electronic-waste-(e-waste)#:~:text=E,waste%20were%20produced)
- [2] Rene, E. R.; Sethurajan, M.; Ponnusamy, V. K.; Kumar, G.; Dung, T. N. B.; Brindhadevi, K., et al. Electronic Waste Generation, Recycling and Resource Recovery: Technological Perspectives and Trends. *J. Hazard. Mater.* 2021, 416, 125664.
- [3] Song, Q.; Li, J. et al. A Review on Human Health Consequences of Metals Exposure to E-waste in China. *Environ. Pollut.* 2015, 196, 450-461.
- [4] Sierra-Romero, A.; Novakovic, K.; Geoghegan, M. et al. Adhesive Interfaces toward a Zero-waste Industry. *Langmuir* 2022, 38 (50), 15476-15493.
- [5] Mulcahy, K. R.; Kilpatrick, A. F.; Harper, G. D.; Walton, A.; Abbott, A. P. et al. Debondable Adhesives and Their Use in Recycling. *Green Chem.* 2022, 24 (1), 36-61.
- [6] Bai, Z.; Xu, Y.; Lee, C.; Guo, J. et al. Autonomously Adhesive, Stretchable, and Transparent Solid state Polyionic Triboelectric Patch for Wearable Power Source and Tactile Sensor. *Adv. Funct. Mater.* 2021, 31 (37), 2104365.
- [7] Wang, C.; Gao, H.; Liang, D.; Liu, S.; Zhang, H.; Guan, H. et al. Effective Fabrication of Flexible Nickel Chains/Acrylate Composite Pressure-Sensitive Adhesives with Layered Structure for Tunable Electromagnetic Interference Shielding. *Adv. Compos. Hybrid Mater.* 2022, 5 (4), 2906-2920.
- [8] Yan, Q.; Zhou, M.; Fu, H. et al. A Reversible and Highly Conductive Adhesive: Towards Self-healing and Recyclable Flexible Electronics. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8 (23), 7772-7785.
- [9] Rose, S.; PrevotEAU, A.; Elzire, P.; Hourdet, D.; Marcellan, A.; Leibler, L. et al. Nanoparticle Solutions as Adhesives for Gels and Biological Tissues. *Nature* 2014, 505 (7483), 382-385.
- [10] Li, Y.; Wong, C. P. et al. Recent Advances of Conductive Adhesives as a Lead-free Alternative in Electronic Packaging: Materials, Processing, Reliability and Applications. *Mater. Sci. Eng. R Rep.* 2006, 51 (1-3), 1-35.
- [11] Jung, M.; Noh, Y.; Suh, D.; Ahn, S. E. et al. Flexible and Thermally Stable Optical Polarizers based on Highly Aligned Carbon Nanotube Sheets for the Visible Spectral Range. *Adv. Mater. Technol.* 2018, 3 (12), 1800203.
- [12] Li, Y.; Zhu, J.; Yang, M.; Cheng, W.; Wang, C.; Cooper, et al. 721: Invited Paper: Improving Improving Thermal Stability of The Coatable Polarizer by Optimization of Materials. *SID*



- Symposium Digest of Technical Papers, 2023, 54 (1), 1012-1014.
- [13] Wang, Q.; Ping, P.; Zhao, X.; Chu, G.; Sun, J.; Chen, C. et al. Thermal Runaway Caused Fire and Explosion of Lithium Ion Battery. *J. Power Sources*, 2012, 208, 210-224.
- [14] Ayer, M. A.; Schrettl, S.; Balog, S.; Simon, Y. C.; Weder, C. et al. Light-Responsive Azo-Containing Organogels. *Soft Matter* 2017, 13 (22), 4017-4023.
- [15] Ito, S.; Akiyama, H.; Sekizaga, R.; Mori, M.; Yoshida, M.; Kihara, H. et al. Light-Induced Reworkable Adhesives based on ABA-type Triblock Copolymers with Azopolymer Termini. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2018, 10 (38), 32649-32658.
- [16] Lee, T. H.; Han, G. Y.; Yi, M. B.; Kim, H. J.; Lee, J. H.; Kim, S. et al. Rapid Photoresponsive Switchable Pressure-Sensitive Adhesive Containing Azobenzene for the Mini-Light Emitting Diode Transfer Process. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13 (36), 43364-43373.
- [17] Kim, D.; Kim, H.; Jeon, W.; Kim, H.-J.; Choi, J.; Kim, Y.; Kwon, M. S. et al. Ultraviolet Light Debondable Optically Clear Adhesives for Flexible Displays through Efficient Visible-Light Curing. *Adv. Mater.* 2024, 36 (14), 2309891
- [18] Nakatani, M.; Fukamachi, S.; Sols-Fernandez, P.; Honda, S.; Kawahara, K.; Tsuji, Y. et al. *Nat. Electron.* 2024, 7, 119-130
- [19] Hohl, D. K.; Weder, C. et al. (De) bonding on Demand with Optically Switchable Adhesives. *Adv. Opt. Mater.* 2019, 7 (16), 1900230.
- [20] Wu, X.; Ren, F.; Ma, H.; Zhou, Z.; Xu, W. et al. The Effect of Surface Morphology on the Peel Performance of UV-Induced Adhesion-Reducing Adhesives. *Mater. Res. Express*, 2022, 9, 2(2), 025302.
- [21] Guo, C.; Pan, Z.; Li, C.; Zou, S.; Pang, C.; Wang, J. et al. Large-Scale Programmable Assembly of Functional Micro-Components for Advanced Electronics via Light-Regulated Adhesion and Polymer Growth. *npj Flex. Electron.* 2022, 6 (1), 44.
- [22] Ebe, K.; Seno, H.; Horigome, K. et al. UV Curable Pressure Sensitive Adhesives for Fabricating Semiconductors. I. Development of Easily Peelable Dicing Tapes. *J. Appl. Polym. Sci.* 2023, 90 (2), 436-441.
- [23] Wang, J.; Dong, Z.; Chen, J.; Chen, S. et al. Preparation of UV Debonding Acrylate Adhesives by a Postgrafting Reaction. *Materials* 2023, 16 (17), 5911.
- [24] Hwang, C.; Back, J. H.; Ahn, D.; Paik, H. J.; Lee, W.; Yu, Y. et al. A Facile Post-modification Strategy for Carboxylic Acid-Functionalized UV-Responsive Pressure-Sensitive Adhesives. *Polym. Chem.* 2022, 13 (2), 193-200.
- [25] Zhou, Y.; Zhang, C.; Gao, S.; Li, W.; Kai, J. J.; Wang, Z. et al. Pressure-Sensitive Adhesive with Enhanced and Phototunable Underwater Adhesion. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2021, 13 (42), 50451-50460.
- [26] Chen, Q.; Yang, Q.; Gao, P.; Chi, B.; Nie, J.; He, Y. et al. Photopolymerization of Coumarin-Containing Reversible Photoresponsive Materials based on Wavelength Selectivity. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2019, 58 (8), 2970-2975.
- [27] Liu, Z.; Tang, Y.; Chen, Y.; Lu, Z.; Rui, Z. et



- al. Dynamic Covalent Adhesives and Their Applications: Current Progress and Future Perspectives. *Chem. Eng. J.* 2024, 497, 154710.
- [28] Sato, E.; Hagihara, T.; Matsumoto, A. et al. Facile Synthesis of Main-Chain Degradable Block Copolymers for Performance Enhanced Dismantlable Adhesion. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2012, 4 (4), 2057-2064.
- [29] Ayer, M. A.; Simon, Y. C.; Weder, C. et al. Azo-Containing Polymers with Degradation On-Demand Feature. *Macromolecules*, 2016, 49 (8), 2917-2927.
- [30] Ma, S.; Webster, D. C. et al. Degradable Thermosets based on Labile Bonds or Linkages: A Review. *Prog. Polym. Sci.* 2018, 76, 65-110.
- [31] Lee, B.; Son, I.; Kim, J. H.; Kim, C.; Yoo, J. Y.; Ahn, B. W. et al. Polymeric Nanocapsules Containing Methylcyclohexane for Improving Thermally Induced Debonding of Thin Adhesive Films. *J. Appl. Polym. Sci.* 2018, 135 (31), 46586.
- [32] Hu, L.; Chee, P. L.; Sugiarto, S.; Yu, Y.; Shi, C.; Yan, R.; Huang, W. et al. Hydrogel Based Flexible Electronics. *Adv. Mater.* 2023, 35 (14), 2205326.
- [33] Jo, Y.; Lee, Y.; Heo, J. H.; Son, Y.; Kim, T. Y.; Park, K. et al. Universal Hydrogel Adhesives with Robust Chain Entanglement for Bridging Soft Electronic Materials. *npj Flex. Electron.* 2024, 8 (1), 39.
- [34] Xu, H.; Li, H.; Zhang, Y.; Guan, Y.; Zhang, Y. et al. Strong and Thermo Switchable Gel Adhesion Based on UCST Type Phase Transition in Deep Eutectic Solvent. *Adv. Sci.* 2024, 11 (31), 2400938.
- [35] Feldstein, M. M.; Bovaldinova, K. A.; Bermesheva, E. V.; Moscalets, A. P.; Dormidontova, E. E.; Grinberg, V. Y. et al. Thermo-Switchable Pressure-Sensitive Adhesives Based on Poly (N-vinyl caprolactam) Non-Covalently Cross-linked by Poly (ethylene glycol). *Macromolecules*, 2014, 47 (16), 5759-5767.
- [36] Bovaldinova, K. A.; Feldstein, M. M.; Sherstneva, N. E.; Moscalets, A. P.; Khokhlov, A. R. et al. Thermo-Switchable Pressure-Sensitive Adhesives with Strong Tunable Adhesion Towards Substrate Surfaces of Different Hydrophilicity. *Polymer* 2017, 125, 10-20.
- [37] Lou, P.; Li, X.; Yao, M.; Nie, J.; He, Y. et al. Thermal Debonding Pressure-Sensitive Adhesive Blended with Liquid Crystal Polymers. *Prog. Org. Coat.*, 2023, 185, 107932.
- [38] Kang, S. H.; Seo, J. Y.; Oh, H. J.; Lee, J. H.; Lee, A. S.; Baek, K. Y. et al. Durable and Thermally Switchable Polysilsesquioxane Adhesives via Dynamic Covalent Bonds: Effect of a Cross-linker on Reversible Chemistry. *Mater. Chem. Front.* 2023, 7 (4), 679-688.
- [39] Anduix Canto, C.; Peral, D.; Prez Padilla, V.; Diaz Rovira, A. M.; Belmez Lled, A.; Orme, C. A. et al. Unraveling the Mechanism of Electrically Induced Adhesive Debonding: A Spectro Microscopic Study. *Adv. Mater. Interfaces* 2022, 9 (1), 2101447.
- [40] Wei, Y.; Wu, M.; Sun, S.; Liu, J.; Yue, Q.; Chen, Y. et al. Electrically Detachable Ionic Conductive Epoxy Adhesives with High Bonding Strength. *ACS Appl. Polym. Mater.* 2023, 5 (9), 7328-7339.



- [41] Wu, M.; Chen, S.; Mei, Y.; Liu, L.; Wei, Y. et al. Interfacial Electrochemistry-Induced Detachable Adhesives with Ultra-High Bonding Strength and Detaching Efficiency. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2022, 14 (36), 41456-41467.
- [42] Liu, J.; Gan, S.; Yang, D.; Yue, Q.; Sun, S.; Wu, M. et al. Multiple Non-Covalent Interactions for Mechanically Robust and Electrically Detachable Liquid-Free Poly (ionic liquids) Iono adhesives. *Chem. Eng. J.* 2024, 491, 151967.
- [43] Yue, Q.; Lv, J.; Huang, S.; Guo, Y.; Wang, Y.; Liu, J. et al. Electrically Detachable and Fully Recyclable Pressure Sensitive Iono adhesive Tapes. *Adv. Funct. Mater.* 2025, 2423865.
- [44] Linghu, C.; Wang, C.; Cen, N.; Wu, J.; Lai, Z.; Song, J. et al. Rapidly Tunable and Highly Reversible Bio-Inspired Dry Adhesion for Transfer Printing in Air and a Vacuum. *Soft Matter* 2019, 15 (1), 30-37.
- [45] Wang, S.; Luo, H.; Linghu, C.; Song, J. et al. Elastic Energy Storage Enabled Magnetically Actuated, Octopus Inspired Smart Adhesive. *Adv. Funct. Mater.* 2021, 31 (9), 2009217.
- [46] Wang, Z. H.; Liu, B. W.; Zeng, F. R.; Lin, X. C.; Zhang, J. Y.; Wang, X. L. et al. Fully Recyclable Multifunctional Adhesive with High Durability, Transparency, Flame Retardancy, and Harsh-Environment Resistance. *Sci. Adv.* 2022, 8 (50), eadd8527.
- [47] Tachi, H.; Suyama, K. et al. Development of Pressure-Sensitive Adhesives Degradable on Ultrasonic Irradiation. *J. of Photopolym. Sci. Tec.* 2017, 30 (2), 253-257.
- [48] Klukovich, H. M.; Kean, Z. S.; Iacono, S. T.; Craig, S. L. et al. Mechanically Induced Scission and Subsequent Thermal Remending of Perfluorocyclobutane Polymers. *J. Am. Chem. Soc.* 2011, 133 (44), 17882-17888.
- [49] Li, M.; Mao, A.; Guan, Q.; Saiz, E. et al. Nature-inspired adhesive systems. *Chemical Society Reviews*. 2024, 53, 8240-8305.