



The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

한 저분자 접착제가 PTFE 에 강하게 붙고 연성적으로 변형된 뒤 에탄올로 씻겨 나갔다

JACS 논문은 접착이 어렵기로 유명한 PTFE 에 실험실 겹침전단 시험에서 강하게 붙으면서 에탄올 세척으로 제거할 수 있는 플루오로-크라운에터 인산염 접착제를 보고한다. *CyclicFP-fmoc* 은 표면처리하지 않은 PTFE 에서 1.3 MPa 에 도달하고 연성 응집파괴를 보였으며, 관련 변형체는 2.3 MPa 에 도달했다. 분광학은 PTFE 계면의 불소-불소 상호작용과 접착제 내부의 수소결합· π -적층을 지지한다. 유망한 재료 결과지만 아직 상용 접착제, 보편적 재활용 해법, 완전한 환경 안전성 평가는 아니다.

Written by Cinzia Vaglio · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Michele Renda and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Small-Molecule Adhesives with Strong and Ductile Adhesion to PTFE, Yet Allowing Easy Wipe-Off Removal*, Kohei Kikkawa, Abir Goswami, Kiyoshi Morishita, Hao Wang, Takashi Nakamura, and Takuzo Aida, *Journal of the American Chemical Society* 148, 29138-29145 (2026) · DOI: 10.1021/jacs.6c07886

PTFE 가 잘 붙지 않는 데에는 이유가 있다

폴리테트라플루오로에틸렌, 즉 PTFE 는 Teflon 같은 상표명으로도 잘 알려져 있으며, 다른 물질과 잘 상호작용하지 않는 성질 자체가 유용한 재료다. 표면에너지가 낮아 많은 액체가 방울져 맺히고, 표면을 식각하거나 거칠게 만들거나 플라즈마 처리하거나 특수 프라이머를 쓰지 않으면 많은 접착제가 잘 붙지 않는다.

이 저항성은 논스틱 코팅이나 화학적으로 불활성인 부품에는 훌륭하다. 하지만 엔지니어가 표면을 영구적으로 손상시키지 않고 PTFE 를 다른 부품과 붙이고 싶을 때는 문제가 된다.

Journal of the American Chemical Society에 실린 한 논문은 이 문제를 특이한 방향에서 공략한 저분자 접착제를 보고한다. Kohei Kikkawa, Abir Goswami 와 동료들은 표면처리하지 않은 PTFE 에도 강하게 붙고, 파괴되기 전에 연성 변형을 보이며, 이후 에탄올로 씻어 PTFE 판에서 제거할 수 있는 플루오로-크라운에터 인산염 분자를 기술한다.

대표 분자의 이름은 **CyclicFP-fmoc** 다. 겹침전단 (lap-shear) 시험에서 표면처리하지 않은 PTFE 판을 1.3 ± 0.1 MPa 의 접착강도로 붙였고, 박리 일 (work of debonding) 은 **1300 N/m** 였다. 1 MPa 는 제곱밀리미터당 1 뉴턴이므로, 측정된 최대 응력 1.3 MPa 는 제곱밀리미터마다 약 130 그램짜리 사과 무게가 작용하는 것과 같은 압력이다. 이는 단위 면적에 대한 비유일 뿐, 실제 시험편의 힘이나 접촉 형상을 뜻하지 않는다. 보고된 박리 일 1300 N/m 는 제곱미터당 1300 줄의 분리 에너지와 같다. 공학적 하중 등급이 아니라 직관적인 시각적 시연으로, 논문은 7 cm^2 접합부가 8 kg 추를 지탱하는 모습도 보여 준다. 접합부는 PTFE 계면이 아니라 접착제 층 내부에서 파괴됐다. 이 점이 중요하다. 시험에서 가장 약한 부분이 PTFE-접착제 계면이 아니었다는 뜻이기 때문이다.



논문의 접착 스트립이 매달린 추를 지탱하는 사진 (Figure 2, 왼쪽) 을 바탕으로 한 연필 그림. 원본 사진도, 축척 도면도, 공학적 하중 등급 도표도 아니다.

AI-generated adaptation —The Clean Paper; source photograph: Kikkawa et al., JACS 2026, Figure 2 (left) Fair-use assertion

결과가 “PTFE 접착 문제가 해결됐다” 는 뜻은 아니다. 통제된 실험실 재료 결과다. 하지만 접착이 어렵기로 유명한 표면에서 강한 접착, 연성 파괴, 닦아내는 제거라는 어려운 조합을 깔끔하게 보여 준 사례다.

보통 강한 접착과 쉬운 제거가 서로 충돌하는 이유

접착제는 대개 타협을 한다. 단단하게 가교된 고분자 접착제는 강할 수 있지만 갑자기 파괴되기 쉽고 깨끗하게 제거하기 어렵다. 더 부드러운 테이프형 접착제는 늘어나며 에너지를 소산할 수 있지만 보통 강도는 낮다.

이 절충은 분자 수준에서 생긴다. 강도에는 응력이 효율적으로 전달되어야 한다. 연성에는 움직임, 재배열, 에너지 소산이 필요하다. 쉬운 제거에는 기재를 파괴하지 않고 끊을 수 있는 결합이 필요하다. 요구 조건들이 서로 다른 방향으로 잡아당긴다.

저분자 접착제는 원칙적으로 제거와 재활용이 쉬울 수 있어 매력적이다. 많은 기존 접착제를 질기게 만드는 길고 서로 얽힌 고분자 네트워크를 만들지 않기 때문이다. 하지만 그 점이 약점이기도 하다. 얽힘이 없으면 저분자가 보통 연성과 높은 접착강도를 동시에 내기 어렵다.

JACS 논문은 고분자 얽힘을 여러 층의 가역적 비공유 상호작용으로 대신하려 한다. 분자는 불소화 크라운 에터 인산염 영역과 우레탄으로 연결된 fmoc 그룹을 결합한다. 쉽게 말하면 불소화 고리는 불소가 풍부한 PTFE 표면과 상호작용하고, 우레탄 그룹은 이웃 접착 분자와 수소결합을 만들며, 평평한 플루오레닐 그룹들은 서로 쌓일 수 있다. 목표는 하나의 마법 같은 결합이 아니다. 함께 작동할 수 있는 약하고 가역적인 상호작용들의 조합이다.

- PTFE 근처의 불소-불소 상호작용,
- 접착 분자 사이의 수소결합,
- 플루오레닐 그룹 사이의 π - π 적층,
- 그리고 즉시 깨지지 않고 응력을 완화할 만큼의 분자 이동성.

주요 PTFE 시험에서 무엇이 나왔나

저자들은 표면처리하거나 세척하지 않은 PTFE 판 사이에 CyclicFP-fmoc 을 넣고 접착제를 가열한 뒤, 시험 전 실온에서 10 분간 두었다.

정량 시험에는 겹침전단을 사용했다. CyclicFP-fmoc 으로 붙인 PTFE 판은 인장응력 1.3 ± 0.1 MPa 에 도달했다. 세 번의 측정 평균 $\pm$ 표준편차다. 헤어드라이어로 접착제를 약 50°C 까지 가열해 적용해도 1.1 ± 0.1 MPa 로 비슷한 값을 냈으며, 반드시 고온 용융만 필요한 것은 아니었다.

저자들은 동일한 PTFE 겹침전단 설정에서 상용 에폭시, 아크릴, 실리콘, 우레탄 접착제와 비교했다. 상용 대조군은 약 $0.1\sim 0.7$ MPa 였고 CyclicFP-fmoc 은 1.3 ± 0.1 MPa 였다. 같은 기재와 같은 시험법으로 비교한 값은 서로 다른 재료와 시험 형상에서 나온 MPa 숫자를 한 순위표에 놓는 것보다 더 정보가 많다.

보관 후에도 숫자는 비슷했다. 상온에서 30 일 후 접착강도는 1.3 ± 0.2 MPa 였다. 판을 강제로 떼어 내 다시 겹치고 재가열하면 1.2 ± 0.2 MPa 였고, 이 과정을 열 번 반복한 뒤에도 약 1.3 ± 0.3 MPa 를 유지했다.

가장 높은 강도를 낸 것은 대표 분자가 아니었다. fmoc 그룹이 세 개인 관련 분자 **CyclicFP-fmoc3** 는 PTFE 에서 2.3 ± 0.2 MPa 에 도달했다. 그래도 논문은 강도, 연성, 메커니즘 증거, 닦아내는 제거의 전체 조합을 보여 주기 때문에 CyclicFP-fmoc 에 크게 초점을 맞춘다.

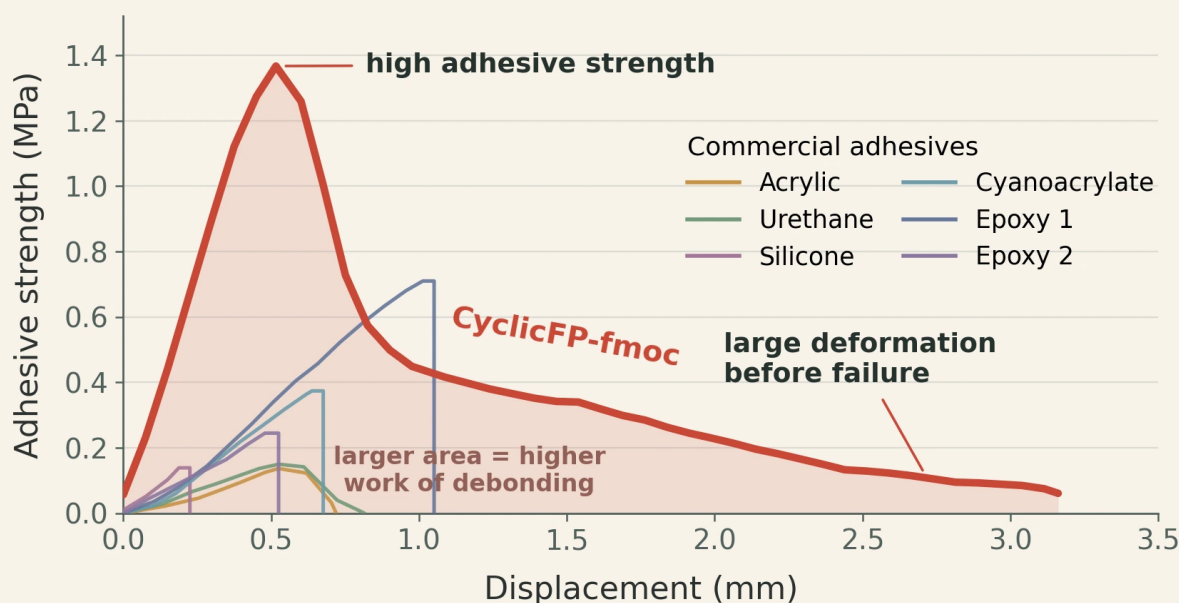
연성이 주장의 나머지 절반이다

강도만 높아서는 충분하지 않다. 취성 접착제는 높은 최대 응력에 도달한 뒤 갑자기 깨질 수 있다. 이 논문의 더 독특한 주장은 CyclicFP-fmoc 이 연성적으로도 거동한다는 점이다.

겹침전단 곡선에서 CyclicFP-fmoc 은 최대 응력에 도달한 뒤에도 변위가 계속되는 동안 응력이 서서히 감소했다. 논문에서 시험한 상용 접착제는 더 취성 접합부처럼 거동해 최대 응력 직후 빠르게 파괴됐다.

CyclicFP-fmoc combines strength and ductility

Approximate stress-displacement traces for untreated PTFE lap joints



Approximate curves digitized from Figure 3f; not raw experimental data.
Lines connect digitized points without smoothing.

CyclicFP-fmoc은 높은 응력 피크와 피크 이후 긴 꼬리를 함께 보인다. 음영 영역은 더 큰 박리 일을 보여 주기 위한 편집상 안내다. 곡선은 Figure 3f에서 대략 디지털화한 것이며 원시 실험 데이터는 아니다.

Chart by The Clean Paper; approximate values digitized from Kikkawa et al., JACS 2026, Figure 3f (source figure not relicensed) CC BY 4.0

저자들은 응력-변위 곡선 아래 면적을 박리 일로 정량화했다. PTFE에서 CyclicFP-fmoc은 **1300 N/m**였고, 시험한 상용 접착제는 **26~314 N/m**였다.

파괴 양상도 이 해석과 맞는다. CyclicFP-fmoc으로 만든 PTFE 접합부는 접착제 내부에서 응집파괴 (cohesive failure)를 보였다. 이는 접착제가 내부 변형으로 에너지를 소산할 수 있었고, 시험 조건에서 PTFE 계면은 접착제 벌크층보다 더 강했다는 뜻이다.

응력완화 실험은 분자 시간척도도 보여 준다. 20°C에서 특성 완화시간은 **60 ms**, Arrhenius 분석의 활성화에너지는 **33.8 kJ/mol**이었다. 쉽게 말하면 접착층이 갑작스러운 응력 집중을 완화할 만큼 빠르게 재배열할 수 있어 정적인 취성 고체처럼 행동하지 않는다는 뜻이다.

저자들이 불소가 중요하다고 보는 이유

PTFE는 탄소-불소 결합으로 이루어져 있다. CyclicFP-fmoc에는 불소화 크라운에터 그룹이 있다. 저자들은 **F-F 상호작용**이 접착제가 PTFE에 붙는 데 도움을 주고, 다른 상호작용이 접착층 내부의 결속과 변형을 돕는다고 주장한다.

여러 대조 실험이 이 방향을 지지한다. CyclicFP-fmoc의 불소 원자를 수소 원자로 바꾼 CyclicP-fmoc은

PTFE에 훨씬 약하게 붙어 약 0.1 ± 0.0 MPa였다. 선형 플루오로에터 인산염인 AcyclicFP-fmoc은 0.3 ± 0.1 MPa에 그쳤다. π -적층 또는 수소결합 요소가 빠진 변형체들도 성능이 떨어졌다.

논문은 이어 분광학과 결정구조를 이용해 상호작용 그림을 지지한다. CyclicFP-fmoc 결정에서 이웃 분자의 불소 원자는 $2.49 \sim 2.91$ Å 떨어져 있는데, 두 불소 원자의 2.94 Å 반데르발스 반지름 합보다 짧다. FT-IR과 가변온도 NMR은 비정질 접착제 안의 수소결합, F-F 상호작용, π - π 적층을 지지한다.

PTFE와 직접 관련된 가장 강한 증거는 고체 **^{19}F MAS NMR**이다. CyclicFP-fmoc을 PTFE 나노입자 또는 얇은 PTFE 시트와 섞으면 스펙트럼이 이동한다. 불소가 없는 대조 분자에서는 같은 이동이 나타나지 않는다. 이는 접착제의 불소화 부분이 PTFE와 상호작용한다는 단순 설계 그림 이상의 실제 증거다.

그래도 이를 “F-F 결합이 PTFE 문제를 해결했다”라고 단순화하면 안 된다. 논문 자체의 모델은 더 층이 많다. 계면의 F-F 상호작용은 PTFE 접착에 기여하고, 수소결합과 π - π 적층은 접착제 내부의 응집력과 연성에 기여한다.

땀아내는 제거는 실제지만 범위가 제한돼 있다

제거 결과는 실용적으로 가장 눈에 띈다. 저자들은 떼어 낸 PTFE 판을 에탄올로 씻었고, 시연에서는 CyclicFP-fmoc이 잔여물 없이 완전히 제거됐다고 보고한다. 접착제를 회수해 반복 사용했을 때도 재사용 시험에서 약 1.2 ± 0.1 MPa의 접착강도를 유지했다.

기존 강력 접착제는 깔끔하게 제거하기 어려운 경우가 많기 때문에 중요하다. PTFE를 단단히 붙였다가 나중에 씻어낼 수 있는 접착제는 수리, 분해, 재사용에 유용할 수 있다.

하지만 경계는 중요하다. 논문은 통제된 시료를 시험했지, 오염된 모든 산업 표면, 풍화된 접합부, 다양한 용매 노출, 장기 노화 조건을 시험하지 않았다. PTFE 판에서 에탄올로 땀아내는 것과 여러 재료로 만든 조립품 전체의 재활용 공정을 증명하는 것은 다르다.

논문은 CyclicFP-fmoc이 PFAS “영원한 화학물질”이 아니라고도 말한다. 이 문장을 완전한 환경 위해성 평가로 확대해서는 안 된다. 환경 잔류성, 독성, 제조 규모, 방출 경로, 규제는 별도의 질문이다.

이 연구가 증명하지 않는 것

- 시장에 바로 내놓을 수 있는 접착제 제품을 보여 주지 않는다.
- 모든 산업 환경에서 표면처리 없이 PTFE를 안정적으로 접착할 수 있다고 증명하지 않는다.
- 모든 기재, 표면 상태, 노화된 접합부에서 에탄올 제거가 똑같이 잘 된다고 보여 주지 않는다.
- F-F 상호작용만으로 접착을 설명한다고 증명하지 않는다. 논문의 메커니즘은 F-F, 수소결합, π - π 적층을 함께 포함한다.
- 완전한 플라스틱 재활용 공정을 보여 주지 않는다.
- 접착 분자의 완전한 환경·독성 안전 프로필을 확립하지 않는다.
- 상용 접착제가 일반적으로 더 나쁘다는 뜻이 아니다. 비교는 이 논문에서 시험한 재료와 PTFE 겹침전단 설정에 한정된다.

결과를 어떻게 평가해야 하나

실험실 재료 논문으로서는 강한 결과다. 저자들은 높은 숫자 하나만 보고하지 않고 강도, 연성, 30 일 저장 후 내구성, 물에 대한 내성, 반복 재접착, 에탄올 제거, 분자 변형체, 제안된 상호작용에 대한 분광학적 증거까지 시험했다.

가장 설득력 있는 조합은 파괴 양상과 대조군이다. PTFE 계면이 먼저 떨어졌다면 주장은 약했을 것이다. 대신 접합부는 접착층 내부에서 파괴된다. 또한 불소화된 고리 구조를 제거하거나 바꾸면 PTFE 접착이 크게 떨어진다.

남은 질문은 규모와 사용 환경이다. 겹침전단 시험은 표준화되고 유용하지만, 실제 접합부는 박리, 충격, 피로, 오염, 온도 주기, 혼합 재료를 겪는다. 통제된 실험실 판 사이에서 아주 잘 작동하는 분자도 공학적 접착제가 되려면 배합, 공정, 내구성 데이터로 발전해야 한다.

왜 중요한가

PTFE는 재료공학에서 까다로운 경계에 있다. 불활성이 PTFE를 가치 있게 만드는 특성이고, 같은 특성이 수리 가능하거나 재활용 가능한 조립품에 통합하기 어렵게 만든다.

이 논문은 무식하게 힘으로 밀어붙이기보다 화학적으로 특정한 경로를 제시한다. PTFE 표면을 거칠게 만들거나 화학적으로 공격하는 대신, 그 표면과 상호작용하면서도 연성 있고 가역적인 접착층을 유지하는 저분자를 설계한다.

이 설계 논리가 일반화된다면 기계적 성능을 전부 포기하지 않으면서 더 쉽게 제거하고 재사용할 수 있는 접착제를 만드는 데 도움이 될 수 있다. 진짜 가능성은 하나의 분자를 완제품 접착제로 보는 데 있지 않다. 강하고, 연성이며, 필요할 때 분리할 수 있는 접착을 위한 분자 설계 전략에 있다.

핵심 요약

Kikkawa, Goswami와 동료들은 PTFE 및 다른 기재용 접착제로 플루오로-크라운에터 인산염 저분자를 보고했다. 대표 분자 CyclicFP-fmoc은 겹침전단 시험에서 표면처리하지 않은 PTFE 판을 1.3 ± 0.1 MPa로 접착했고, PTFE 계면이 아니라 접착제 내부에서 파괴됐으며, 박리 일은 1300 N/m 였다. 저장 및 반복 재접착 뒤에도 성능을 유지했고, 에탄올 세척으로 PTFE 판에서 제거할 수 있었다. 관련 변형체 하나는 2.3 ± 0.2 MPa에 도달했다. 분광학과 대조 분자는 F-F 상호작용이 PTFE 계면에 기여하고, 수소결합과 π - π 적층이 접착층 내부의 응력 소산을 돕는 메커니즘을 지지한다. 이는 PTFE에 강하고 연성이며 닦아낼 수 있는 접착을 보여 준 유망한 실험실 결과이지, 아직 상용 접착제도, 보편적 재활용 해법도, 완전한 환경 안전성 평가도 아니다.

출처

Kikkawa et al., Small-Molecule Adhesives with Strong and Ductile Adhesion to PTFE, Yet Allowing Easy Wipe-Off Removal, *Journal of the American Chemical Society* 148, 29138-29145 (2026)

<https://doi.org/10.1021/jacs.6c07886>