

극한 환경 대응용 점·접착 소재의 기술 동향

이향무·정인우[†]

경북대학교 응용화학공학과
(2019년 3월 17일 접수)

Technology Trends in Adhesives for Extreme Environments

Hyang Moo Lee, In Woo Cheong[†]

School of Applied Chemical Engineering, Kyungpook National University, Daehak-ro 80, Buk-gu, Daegu, Korea

1. 서론

접착 및 접착(이하 점·접착으로 표기) 소재는 일상생활에서부터 자동차, 전기·전자, 건축, 토목, 조선, 우주·항공 분야에 이르기까지 다양한 분야에서 필수적인 소재이다[1-6]. 또한 점·접착 소재 산업은 일상생활에서 사용되는 범용 제품과 우주·항공 등 고도의 기술이 요구되는 기술집약적 산업 간의 양극화가 심한 특징을 가진다. 실제로 점·접착 소재는 아래의 Fig 1. 에 나타난 것과 같이 우리 주변에서 흔히 사용하는 풀이나 접착테이프와 같은 제품에서부터 우주·항공기 구조용 접착제, 고진공 챔버 및 원자로 등의 첨단 산업제품까지 매우 다양하게 존재한다[2-6]. 그러나 최근 환경 및 에너지 이슈와 관련해 접착제가 제품의 경량화를 위한 필수 소재로 인식되어 그 사용 분야가 점차 확대되고 있으나 특수한 용도에 국한된 분야인 극한 환경에서 활용되는 점·접착제의 시장 규모는 그다지 크지 않다.

고온, 극저온, 고진공, 고진동, 수중 등 다양한 극한 환경에서 사용되는 장비 및 수송 기기에는 해당 환경에 적합한 고성능의 점·접착제의 사용이 요구된다. 실제로 미국항공우주국(NASA)의 우주왕복선 외장재는 24,000여개의 산화알루미늄 세라믹 타일을 접착제로 접착하였으며, -80°C 에서 대기 진입 시 최대 $1,250^{\circ}\text{C}$ 까지 매우 넓은 온도범위에서 버틸 수 있음은 잘 알려진 사실이다. 2005년 미국 NASA의 Collins 등의 보고에서도 내열 접착제의 개발은 높은 가열 속도를 견딜 수 있으며, 우주선의 총중량을 최소화하고 탑재 물량을 높이기 위한 우주항공용 열보호시스템(thermal protection system, TPS)의 개발에 초점을 맞추어 진행되고 있음을 알 수 있다.

극한 환경용 점·접착제의 개발과 사용은 산업적으로 매우 중요한 위치를 차지하고 있음에도 불구하고 제한된 자료와 정보 미공개 등으로 인해 점·접착제의 요구물성, 소재의 종류 및 시장 규모 등에 대한 정보가 지극히 제한적이다. 본 총설에서는 극한 환경에서 사용가

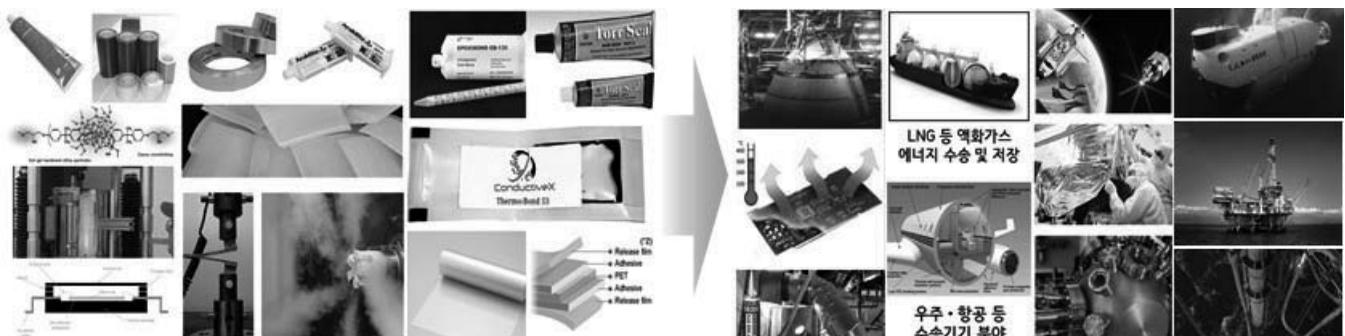


Figure 1. 극한환경 점·접착 소재의 예와 극한환경용 점·접착 소재가 사용되는 여러 분야

[†] Corresponding author: In Woo Cheong (inwoo@knu.ac.kr)

Table 1. 극한환경 대응을 위한 접착제의 주요 요구 물성

주요 물성	물성치 정의	낮은 수준	중간 수준	높은 수준
열안정성	최대 연속 사용 시온도 (°C)	150 ~ 200	250 ~ 300	> 350
치수안정성	선형열팽창계수 ($\times 10^{-6} \text{m/m} \cdot ^\circ\text{C}$)	> 30	10 ~ 20	≤ 1
유연성	굴곡 강도 (GPa)	< 10	20 ~ 30	≥ 40
난연성	LOI ^a (%)	< 20	30 ~ 40	> 50
전기 절연성	유전강도 kV/mm	< 20	25 ~ 30	≥ 35
가스방출성	휘발응축물 ^b (%)	> 0.5%	< 0.1%	< 0.05%

능한 고분자계 점·접착제를 중심으로 요구 물성, 종류와 특징 및 향후 기술 개발 방향과 문제점 등에 대한 자료를 통해 그 이해의 폭을 조금이나 넓히고자 한다.

2. 극한환경 대응용 점·접착제의 요구물성

극한 환경의 사전적 의미는 대부분의 생명체에게 생존에 있어서 도전적이며 극단적인 조건의 환경을 뜻한다. 통상 지리적으로 온도가 낮은 극지, 매우 건조한 사막, 고온의 화산지역, 높은 압력의 심해, 대기가 희박한 대기권 및 우주 등을 들 수 있다. 예를 들어 초음속 항공기의 구조용 접착제의 경우 통상 마하 2이상의 속도 및 $-55 \sim 200^\circ\text{C}$ 사이의 온도에서 접착조인트의 열에 대한 안정성이 유지되어야 한다. 그러나 현재 상용화된 대부분의 고온용 접착제는 일반적으로 저온에서 매우 부서지기 쉬운 반면 저온용 접착제는 고온에서 너무 약하거나 열분해되기 쉽다. 이러한 극한 조건에서 사용해야 하는 제품들은 주변 환경에 영향을 받기 때문에 그 환경에 적합한 물성이 요구되고 있으며, 극한 환경 대응을 위한 접착제의 기본 성능에 대해서 Table 1. 에 정리하였다.

극한 환경에서 사용 가능한 점·접착제는 사용 기간 동안 기본적인 기계적 강도나 접착력 이외에 열안정성, 온도 변화에 따른 치수 안정성(dimensional stability), 저온유연성, 난연성, 전기 절연성, 낮은 가스방출성(low-outgassing) 등이 요구된다[7]. 고온 접착제는 높은 내열성 및 이를 위한 화학적 구조적 특성으로 용융점도가 매우 높거나 용매에 대한 용해성이나 가공성이 좋지 않아 접착제의 시공이나 가공 시 에너지 소요 비용, 흐름 용이성, 순화 주기 등의 부가적인 특성이 요구되는 반면 저온 접착제의 경우 LNG 선박에서 수요가 많은데, -170°C 수준의 저온에서의 유연성뿐만 아니라 낮은 가스투과도(gas permeability)가 요구된다. 한편 고진공용 접착제의 경우 낮은 가스방출특성이 요구되는데, 이는 가스 방출이 적을수록 깨끗한 고진공 환경을 만들고 유지 관리하는데 문제가 되기 때문이다. NASA와 유럽우주국(European Space Agency)은 가스 배출 제

품이 광학 요소, 방열기 또는 태양 전지에 응축되어 흐러지기 때문에 우주선에 사용되는 저 가스방출 소재의 사용을 요구하고 있다[2-4].

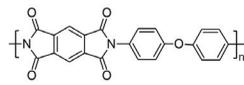
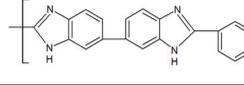
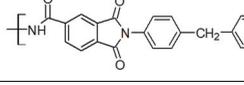
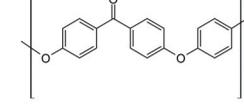
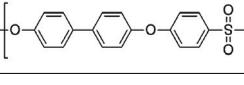
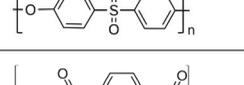
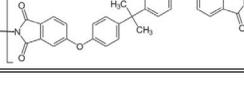
3. 극한 환경용 점·접착 소재의 종류 및 특징

3.1. 고온용 점·접착 소재

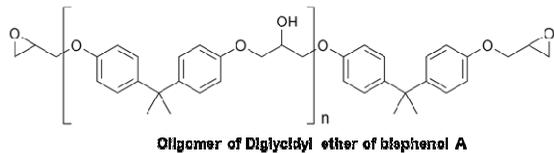
극한환경 대응용 점·접착 소재 중 가장 많이 개발된 것은 고온 환경에서 사용하기 위한 점·접착 소재로, 우주·항공 및 군수산업의 성장과 함께 발전하여 왔으며, 근래에는 전기·전자, 반도체 및 디스플레이 산업에 이르기까지 폭넓게 확대되고 있다. 역사적으로 볼 때 고온 접착제의 개발은 1950년부터 열 안정성이 비교적 낮게 요구($100 \sim 200^\circ\text{C}$) 되는 에폭시나 페놀 수지계의 접착제가 주를 이루다가, 1970-80대부터는 사다리(ladder) 구조의 방향족 고분자계의 개발이 진행되었으며 대부분이 NASA에서 개발한 우주·항공 분야의 응용을 위한 구조용 접착제이다. 2000년 이후 부터는 금속 산화물이나 탄소 구조체(탄소섬유, 탄소나노튜브, 그래핀 등)를 이용한 복합소재의 개발이 주를 이루고 있다. 이러한 고온 접착제는 그 사용량이 많지 않은 반면 기술의 난이도가 높은 특성으로 인해 미국이나 일본 등 선진국에서도 우주항공연구기구와 같은 국가 주도로 연구 개발이 진행 중에 있다. 고온용 접착제는 높은 내열 특성을 가져야 하기 때문에 고분자뿐만 아니라, 무기계 및 유·무기 복합소재가 많이 활용된다.

유기 혹은 고분자계 접착제의 경우, 고온용은 그 온도 및 사용 시간에 따라서 여러 가지로 분류가 가능하며, $100 \sim 250^\circ\text{C}$ 에서 1년 이상 사용 가능한 것에서부터 $250 \sim 370^\circ\text{C}$ 에서 1,000시간 이상 견딜 수 있는 것들 혹은, $370 \sim 430^\circ\text{C}$ 에서 200시간 이상, 매우 높은 온도의 경우 $500 \sim 800^\circ\text{C}$ 에서 수 분간 견딜 수 있는 것까지 다양하다. 이러한 고온에서의 안정성을 위해서는 기본적인 접착력뿐만 아니라 높은 연화점, 용융온도, 유리전이온도, 열분해온도, 내산화성 등이 요구된다.

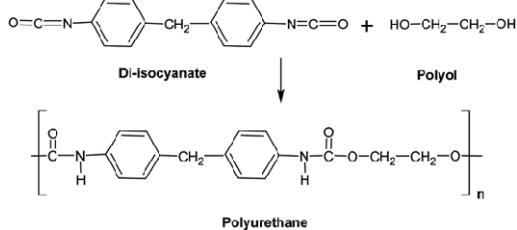
Table 2. 고온 접착제용 고분자의 화학구조식과 유리전이온도

이름	화학식	T _g (°C)
Polyimide (Kapton)		350~420
Polybenzimidazole (PBI)		430
Polyamideimide (PAI)		280
Polyetherether ketone (PEEK)		140
Polyphenylsulfone (PSU)		220
Polyethersulfone (PESU)		190~230
Polyphthalamide (PPA)		370
Polyetherimide (PEI)		220

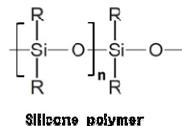
(a)



(b)



(c)

**Figure 2.** 극저온 접착제로 사용되는 고분자의 구조: (a) 에폭시 접착제용 올리고머, (b) 폴리우레탄, (c) 실리콘 고분자.

고온에서 사용하기 위한 고분자 접착제는 일반적으로 사용 온도 범위가 150 ~ 450°C 정도이며 대표적인 물질로는 열가소성 폴리이미드(polyimide, PI)[1], 폴리벤즈이미다졸(polybenzimidazole, PBI)[8], 폴리아미드 이미드(polyamide imide, PAI)[9,10], 폴리에테르에테르(polyetherether ketone, PEEK)[11], 폴리페닐설폰(polyphenylsulfone, PPSU)[12], 폴리에테르설폰(polyether sulfone, PESU)[13], 폴리프탈아미드(polyphthalamide, PPA), 폴리에테르이미드(polyether imide, PEI)[14] 등의 소재가 있다(Table 2). 하지만 유기 물질의 경우 고온에서 산화되는 문제가 있기 때문에 500°C 이상의 온도가 요구되는 경우에는 사용할 수 없으며, 사용 온도 범위 내라고 하더라도 고온에서 장기 사용 시 유기 접착소재가 변형이 일어나 접착 능력이 저하되는 문제가 있을 수 있다. 유기물의 경우에는 일정 온도 이상의 고온에서 사용하기에 한계가 있기 때문에 이보다 더 높은 온도를 요구하는 경우에는 세라믹 계열의 소재를 사용한다.

일반적으로 무기계의 경우 고분자계 접착제가 사용될 수 없는 고온 접착, 실링, 코팅 등의 목적으로 미사일, 로켓 부품이나 버너, 점화 플러그, 세라믹스 전자부품 등에 사용된다. 무기계 고온용 점·접착 소재는 실리카계, 알칼리금속 규산염계, 인산염계 등으로 대부분 1,000°C 이상의 내열성을 가지고 있으나 경화 반응 시에 탈수를 동반하므로 기밀성이 있는 접착층을 얻을 수 없는 문제점을 가진다. 많이 사용되는 소재로는 알루미늄, 지르코니아, 마그네시아, 실리카 등이며 약 2,000°C 이하의 온도에서 사용 가능하며, 산소가 없는 특수한 환경인 경우 그라파이트를 베이스로 하는 3,000°C까지 사용이 가능한 접착제도 개발되었다. 유무기 복합소재의 경우 열가소성 혹은 열경화성 수지(통상 에폭시, 실리콘 등)를 매트릭스로 하여 무기필러를 첨가하는 구조로 되어 있으며, polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS), 실리카, 세라믹 혹은 금속산화물 입자, 유리섬유, 탄소나노튜브, 그래핀, Boron Nitride (BN) 등이 사용된다.

고온용 점·접착소재는 현재 경량화를 위한 자동차, 선박, 우주·항공 등의 수송기기의 구조용 접착제로 가장 많이 사용되고 있으며, 고온 공정이 요구되는 반도체 웨이퍼, 칩 및 디스플레이 공정 등에도 사용되고 있다. 내열 점·접착소재의 시장 규모는 2013년 31억 달러로 추정되고 있으며, 2014 ~ 2019 년에 4.6%의 연평균 성장률을 기록하여 40억 달러로 전망되고 있다. 또한 소위 스페셜티 접착제 중 40% 이상을 차지하여 가장 큰 시장 규모를 가진다[15].

3.2. 극저온용 점-접착 소재

극저온용 점-접착소재란 온도 4 ~ 103 K의 온도 범위 내에서 장기 사용이 가능하며 온도 변화에 따라 우수한 접착강도, 유연성, 열전도도, 치수안정성 및 낮은 열팽창률과 가스투과도를 가지는 접착제를 의미한다. 특히 진동과 움직임이 빈번히 발생하는 항공·우주 및 운송 분야에 많이 활용되고 있다. 국내는 최근까지 연구개발의 사례가 소수에 불과하고, 대부분이 LNG 선박용 접착제에 집중되고 있다. 극저온용 접착제의 경우에는 -170°C 이하의 극저온에서 접착력 이외에도 유연성, 열에 의한 화학적 변형보다는 피착제(substrate)와 접착제의 열팽창계수 차이에 의한 부피 변화 등의 물성제어가 중요한 이슈이다. 피착제와 접착제의 열팽창계수 차가 큰 소재를 극저온에서 사용할 경우

온도에 의한 부피 변화로 인하여 접착 부위에 미소 균열 혹은 층간 분리와 같은 문제가 발생할 수 있기 때문이다. 이 외에도 급격한 온도 변화에 물성 및 접착력의 노화가 없어야 한다.

분야별로 요구되는 극저온 접착제의 물성을 살펴보면, 위성발사체의 경우 극저온 열팽창율과 고진동 접착력, 우주선의 경우 탄소소재와의 열팽창율 유사도와 접착제 자체의 경량성, 항공기에서는 온도변화에 따른 열팽창율과 높은 절연성, 수소자동차 및 LNG 보관탱크의 경우 가스투과도와 극저온 (20 ~ 110 K) 접착력 등이 요구된다[7].

극저온용 접착제로 가장 많이 사용하는 소재는 실리콘[16], 에폭시[17,18], 폴리우레탄계[19] 소재이고, 최근 이중에서 에폭시 소재가 가장 연구와 개발이 활발하게 진행되고 있다 (Fig 2. 참조). 에폭시 소재의 극저온용 접착제는 일반적으로 bisphenol A 유도체를 에폭시 베이스 레진으로 하고, amine 혹은 acid anhydride를 경화제로 하는 2액형 접착제가 가장 일반적이다. 이렇게 만들어진 에폭시계 접착제는 내열성 및 전기 절연 특성이 우수하지만 극저온에서의 접착 강도와 유연성 면에서는 우레탄계 접착제에 비하여 다소 떨어진다. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위해 에폭시 고분자에 실리콘계 올리고머나 고분자를 결합하여 실릴화(silylation)를 유도하거나 아민 가교점 사이의 분자 길이를 제어하여 저온에서의 유연성을 향상시킨다 [20,21]. 에폭시 접착제의 단점 해결을 위해 우레탄 고분자를 도입하기도 하거나, 극저온에서 열팽창계수 차이로 인해 발생하는 접착제면의 잔류응력을 최소화하기 위해 낮은 열팽창계수의 특성을 지닌 메타 아라미드 섬유나 세라믹 입자를 에폭시 소재에 보강재로 사용한 예도 있다.

폴리우레탄계 접착제는 극저온에서 에폭시 접착제에 비하여 우수한 물성을 보여준다는 결과가 여러 논

문에서 보고되었다. 폴리우레탄은 기본적으로 디이소시아네이트와 폴리올로부터 합성할 수 있으며, 사용한 이소시아네이트와 알코올의 종류나 비율에 따라 다양한 물성을 가지는 소재를 얻을 수 있다. 예를 들면 폴리올 물질로 지방족 폴리에스터 폴리올을 사용할 경우 상온보다 극저온에서 접착 강도가 상승하는 경향을 보이며, 방향족 폴리에스터 폴리올은 그 반대의 경향을 보인다. 혹은 통상 이소시아네이트의 당량을 폴리올에 비하여 1당량을 넘게 되면 접착강도가 증가하는 경향을 보인다. 또한 폴리올의 분자량 혹은 소프트 세그먼트(soft segment)의 길이가 길어지면 상온에서의 물성은 낮지만 극저온에서는 상대적으로 우수한 접착 강도를 보이는 경향이 있다.

대부분의 점-접착 소재로 사용되는 고분자 물질이 극저온에서 취성이 증가하고 접착제로서의 효율이 감소하는 등 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위한 방법 중 하나로 필러(filler)를 첨가하여 해당 문제를 해결하기 위한 시도가 있다. 초저온 복합 소재를 위하여 대표적으로 많이 사용되고 있는 필러 소재로는 탄소 소재(탄소 섬유, 그래핀 등), 몬모릴로나이트(montmorillonite, MMT), 나노 탄산칼슘, 나노 알루미늄 등을 사용하며, 이러한 소재를 이용하여 제조된 복합 소재는 소재 자체의 물리적 특성을 향상시킬 뿐만 아니라, 극저온에서 온도에 의한 수축현상을 감소시켜 수축에 의하여 발생할 수 있는 문제를 완화할 수 있다. 극저온용 복합체를 접착제로 이용한 예로 일본 우주항공연구개발기구(JAXA)에서 탄소 섬유와 에폭시계 접착제를 이용한 복합체로 극저온에서 비강성(specific stiffness)과 비강도(specific strength)를 크게 증가시킨 연구사례가 있다 [22].

극저온용 접착제는 특별히 사용 조건에 따라 물성을 최적화해야 할 필요가 있다. 에폭시 접착제의 경우 베이스 레진이나 경화제의 화학 구조, 분자량, 작용기의 종류 등에 따라 접착제의 물성이 크게 달라질 수 있다. 예를 들면 베이스 레진의 방향족 함량이 높아지면 접착제의 경도가 증가하고, 소재의 유리전이온도가 높아지며, 비중이 낮아지는 효과가 있다. 또한 일반적으로 가교 밀도를 높이면 소재의 내열성이 향상되어 어느 정도 높은 온도에서도 버틸 수 있게 되지만 극저온용의 경우에는 높은 가교밀도는 오히려 취성(brittleness)이 증가하여 접착제로서의 능력이 감소할 수 있다. 따라서 극저온용 에폭시 접착제는 용도에 따라 가교된 구조보다 2관능기의 베이스 레진 및 경화제를 이용하여 만들어지는 선형 구조의 접착제가 더 우수한 접착력을 보여준다.

저온 접착제의 세계 시장 규모는 2018년 약 34억 달러, 2022년 46억 달러로 전망되고 있으며, 스페샬티 접

착제 중 약 35% 이상 점유하고 있어 중요 소재산업으로서의 위치를 차지하고 있다. 또한 현재 글로벌 기업의 점유율이 95% 이상 되고 있고, 국내의 경우 LNG 분야에만 치우쳐 있어 이에 대한 연구 개발이 절실히 요구되고 있다. 또한 향후 수소에너지, 원자력 산업, 항공·우주 등의 분야에서도 극저온용 복합소재의 수요가 폭발적으로 증가할 것으로 예상되고 있다[23].

3.3. 고진공용(Low outgassing) 점·접착 소재

고진공용 점·접착 소재는 고진공의 극한환경에서 작동되는 다양한 공정, 장비 및 수송기에 사용되는 소재로 낮은 온도 팽창율, 낮은 가스발생(low outgassing) 및 가스투과도를 가지는 점착제를 말하며, 가스 발생량의 경우 통상 온도 125°C, 압력 10-8 torr에서 휘발응축물의 양(collectable volatile condensable material, CVCM)이 0.1% 이하를 만족하는 점착제를 뜻한다. 자동차, 선박, 우주·항공 분야뿐만 아니라 반도체 웨이퍼 및 칩 공정, 디스플레이 부품 공정, 광학, 금속박막코팅 및 고분자합성 등 고진공 환경 하에 있어서의 다양한 산업적 공정에 활용되고 있다.

진공용 점·접착 소재는 고진공 상태로 유지해야 하는 환경에서 주로 사용되는데, 보통의 점·접착 소재들은 고진공 상태에서 사용된 용매나 점·접착 소재 안에 갇혀있던 혹은 녹아있던 공기나 휘발성 성분이 빠져나와 진공상태에 부정적인 영향을 끼친다. 이때 점·접착 소재로부터 공기나 휘발성분이 빠져나오는 현상을 outgas라고 하며, 고진공용 점·접착 소재로 사용하기 위해서는 outgassing 현상으로 인하여 소재로부터 빠져나오는 기체 성분의 양을 정량적으로 분석해야 할 필요가 있다.

진공환경에서 소재로부터 발생하는 휘발성 물질의 양을 측정하는 방법은 여러 가지가 있지만 그 중 가장 잘 알려진 측정 방법은 NASA에서 고안한 ASTM E-595 방법이다[24]. 이 방법은 고온 진공상태(125oC, 0.007 Pa 이하)에서 24시간동안 감소한 시료의 질량(total mass loss, TML)과 냉각판에 수집된 물질의 양(CVCM)을 측정하는 방법이다(Fig 3. 참고).

고진공 상태를 유지할 필요가 있는 분야에서는 outgassing 현상이 적은 소재일수록 유리하다. 따라서 고진공용 점·접착제는 low outgassing 점·접착제라고도 하는데 이러한 소재는 진공이 요구되는 우주항공, 전기·전자, 광학 산업 등 여러 첨단 산업에서 널리 사용되고 있다. 현재 산업에서 가장 많이 사용되고 있는 low outgassing 점·접착소재는 에폭시 소재 이며[2,25], 그 뒤로 실리콘 소재가 많이 사용된다[26]. 에폭시 소재는 우수한 물성, 점착성으로 인하여 low outgassing이 요구되는 분야에서 이전부터 많이 사용되던 소재이다. 반

면 일반적인 실리콘 소재의 경우 휘발성이 가능한 물질이 많이 섞여있어 low outgassing 점·접착제로는 잘 활용되지 않던 소재이지만[3], 이후 고순도 실리콘을 이용한 소재가 개발되면서 실리콘 소재가 low outgassing 점·접착제로 사용되기 시작하였다. 실리콘 소재는 일반적으로 에폭시 소재에 비하여 매우 유연(flexible)하며 갑작스런 온도변화에 대한 안정성이 높다. 하지만 유연한 만큼 에폭시 소재에 비하여 물리적 강도가 매우 약하다는 단점이 있다. 따라서 실리콘 소재의 low outgassing 점·접착제는 물리적 강도가 요구되지 않고, 유연함 혹은 갑작스러운 온도 변화가 발생할 수 있는 곳에 사용되고, 에폭시 소재는 반대로 강한 물리적 강도가 요구되는 곳에 사용된다.

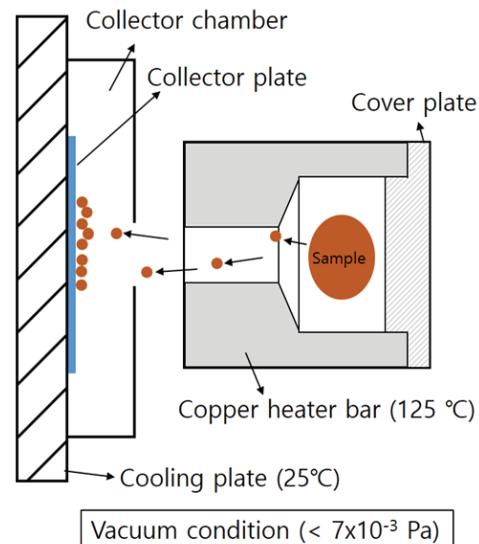


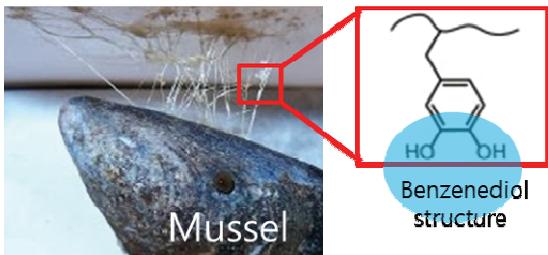
Figure 3. ASTM E-595법에 따른 TML 및 CVCM 측정 방법 [24].

Low outgassing 점·접착제는 디스크 드라이브 어셈블리, 태양열 어레이 및 패널, 다양한 광학렌즈를 이용한 시스템, 항공기 및 우주 응용 분야, 의료용 필터, 고전력 전원, 클린룸 어플리케이션, 위성제작 등 다양한 분야에도 활용 가능하기 때문에 앞으로도 활용 분야가 확대할 것으로 예상된다[4,27]. 다만 low outgassing 점·접착제에 대한 기술력 확보를 위해서는 다양한 진공 및 온도 조건에서의 현장적용 테스트를 통해서 안정성을 확보하고, 소재의 적용에 적합한 부품의 설계 및 제조 공정이 함께 개발되어야 한다. low outgassing 점·접착제에 대한 연구 개발은 우주·항공 및 선박 등 수송 분야와 방위산업, 반도체, 광학 등 국가적 전략 산업이거나 기반 산업적 성격이 강한 산업에 적용되고 있어서 개발 초기에 경제성을 논하기가 적절하지 않으나 세계 시장규모는 정확 알려진 바는 없으나 2020년 기

준 약 24.6억 달러로 예측되고 있으며, 외국 선진사(MasterBond 등)들이 독점, 전량 수입에 의존하고 있어 개발 시 활용 분야, 수입 대체 등 파급효과가 크다.

3.4. 기타 극한환경 대응용 점·접착 소재

위에서 서술한 소재들을 제외하고도 여러 분위기의 극한 환경에서 사용가능한 점·접착 소재가 개발되고 있는데, 대표적으로 수중 환경, 고진동 환경, 고 충격 등이 있다. 위에 서술한 극한환경 대응용 점·접착 소재를 제외하면 최근 가장 많이 연구되고 있는 관련 소재는 수중 환경용 점·접착 소재이다. 특히 수중 환경에서 사용 가능한 점·접착제는 물이 흐르는 파이프라인 보수, 수중에서 유도등이나 센서 부착, 혈액 등으로 인하여 젖어있는 생체조직의 봉합 혹은 젖어있는 소재의 접착이 필요한 거의 모든 목적으로 사용할 수 있지만 몇 가지 문제로 인하여 최근까지도 점·접착 소재 관련 연구에서 중요한 이슈 중 하나이다.



Strong adhesion in water due to...

- coordination with metal ions or ceramics
- π - π interaction with aromatics
- hydrogen bonding with ceramics
- van der Waals interaction

Figure 4. 홍합의 족사는 수중에서 강한 접착력을 만들어내며 족사 단백질을 구성하는 고분자의 카테콜 구조는 다양한 피착제와 잘 결합한다.

피착제를 접착제를 이용하여 접착할 시 표면에 묻은 물은 오염물로 작용하여 접착제가 피착면과 직접적으로 닿는 것을 방해하기 때문에 시아노아크릴(Cyanoacrylate) 계나 에폭시계를 포함한 대부분의 기존 접착제들은 수중에서 접착이 불가능하거나 접착이 되더라도 접착 소재가 수분에 의하여 팽윤되거나 부식되는 등의 문제가 생기기도 한다. 하지만 자연에서 굴이나 홍합과 같은 일부 패류나 Sandcastle worm 등을 포함한 수생 생물들은 이미 수중에서 매우 강한 접착 성분을 분비 및 활용하고 있으며, 최근 많은 과학자들이 이를 모사하여 수중환경에서 적용 가능한 점·접착 소재를 연구하고 있다[28-30] (Fig 4. 참조).

수중 환경용 점·접착 소재 연구의 예로 미국의 Michigan Technological University (MTU)의 연구진은

홍합의 점성 분비물을 기반으로 하여 수중의 여러 피착제에 달라붙는 점·접착 소재를 개발하고 있으며[31], 같은 미국의 Purdue University의 연구진은 홍합의 접착 단백질을 모사하여 수중에서 천연 홍합 접착제보다 금속 표면에 대하여 17배 강한 접착력을 가지는 접착제를 만드는데 성공하였다[30,31]. 캐나다의 University of Waterloo에서도 해양생물들의 점·접착 물질을 모사하여 고분자, 세라믹, 금속 등 다양한 소재를 수중에서 전처리과정 없이 접착시키는데 성공하였다[32]. 국내의 경우에도 KAIST의 이해신 교수와 포항공대의 차형준 교수 연구실에도 홍합 단백질을 기반으로 한 접착제를 개발한 바 있다. 성균관대학의 한 연구진은 문어의 빨판을 모사하여 패치에 마이크로 크기의 빨판을 배열하여 수중에서 엄지손톱 크기의 패치로 400 g 이상의 무게를 버틸 수 있으며 10,000회 이상 반복적으로 탈부착이 가능한 접착패치를 개발하였다[35-37].

4. 결론

지금까지 다양한 극한환경에서 사용이 가능한 점·접착 소재의 종류와 특징들에 대해서 알아보았으며, 많은 경우 폴리이미드, 폴리설폰, 에폭시, 우레탄, 실리콘 등과 같은 소재가 개발, 사용되고 있음을 알 수 있다. 지금까지 소개한 점·접착 소재들은 비록 범용 점·접착 소재에 비해서 수요 및 시장규모가 작은 산업 분야이기는 하지만 위의 본문에서 여러 차례 언급한 것처럼 매우 다양한 특수 산업 분야에서 사용되고 있으며, 우주·항공, 반도체, 초전도 산업 등 최첨단 산업 분야에서 수요가 증대될 것으로 예상된다. 그러나 이러한 고성능 점·접착제는 범용 점·접착제에 비하여 그 사용량이 상대적으로 작고, 개발기간 동안 극한환경이나 이를 모사하고 평가할 수 있는 가능터를 제공할 산업체(우주·항공 및 방위산업 관련 업체)나 국책 연구기관(한국화학연구원, 한국세라믹기술원, 재료연구소, 국가기술표준원, 우주항공연구원 등)의 주도적인 개발 및 참여가 요구된다. 또한 물리학, 화학, 소재, 기계, 전자 등 다양한 전문 분야의 지식이 요구되는 복합적인 분야이며, 여러 가지 기술적/시장적 측면에서의 문제점들로 인하여 국내의 극한환경용 점·접착 소재의 연구 및 개발이 지연되고 있는 실정이다. 이러한 문제의 해결을 위해 (1) 국내의 극한환경을 시험/평가할 수 있는 기관 간 연계협력 환경 마련, (2) 발전하는 기술과 그에 따른 요구 조건을 충족할 수 있는 지속적이고 유기적인 개발 환경 구축, (3) 개발된 기술을 활용할 수 있도록 법적, 제도적, 경제적 지원, (4) 정부 차원에서의 지속적인 연구 개발 지원이 필요하다.

References

1. E. A. S. Marques, L. F. M. D. Silva, M. D. Banea, and R. J. C. Carbas, *J. Adhes.*, **91**, 556 (2015).
2. J. H. Han, and C. G. Kim, *Compos. Struct.*, **72**, 645 (2006).
3. E. Grossman, and I. Gouzman, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B.*, **208**, 48 (2003).
4. T. M. Mower, *Int. J. Adhes. Adhes.*, **87**, 64 (2018).
5. M. Zatarain, C. Villasante, A. Sedano, and R. Bueno, *CIRP Ann.*, **53**, 345 (2004).
6. J. J. M. Machado, P. M. R. Gamarra, E. A. S. Marques, and L. F. M. da Silva, *Compos. Part B-Eng.*, **138**, 243 (2018).
7. 조동철, and 정인우, 극저온 접착제의 특성 및 개발 현황, *J. Adhes. Interface*, **15**, 123 (2014).
8. H. M. S. Iqbal, S. Bhowmik, and R. Benedictus, *Int. J. Adhes. Adhes.*, **72**, 43 (2017).
9. C. P. Yang, G. S. Liou, C. C. Yang, and K. J. Chen, *J. Appl. Polym. Sci.*, **71**, 1691 (1999).
10. J. Adduci, L. L. Chapoy, G. Jonsson, J. Kops, and B. M. Shinde, *Polym. Eng. Sci.*, **21**, 712 (1981).
11. R. F. Hicks, S. E. Babayan, J. Penelon, Q. Truong D. S. F. Cheng, V. V. Le, J. Ghilarducci, A. G. Hsieh, J. M. Deitzel, and Jr. J. W. Gillespie, *SAMPE Fall Tehnical Conference Proceedings: Global Advances in Materials and Process Engineering*, **1** (2006).
12. P. J. Jones, R. D. Cook, C. N. McWright, R. J. Nalty, V. Choudhary, and S. E. Morgan, *J. Appl. Polym. Sci.*, **121**, 2945 (2011).
13. M. Son, H. G. Choi, L. Liu, H. S. Park, and H. C. Choi, *Environ. Eng. Res.*, **19**, 339 (2014).
14. S. Sasaki, and Y. Hasuda, *J. Adhes.*, **25**, 159 (1988).
15. High Temperature Adhesives Market - Global Forecast to 2019, Markets and Markets (2019).
16. A. S. Clair, and T. S. Clair, *Int. J. Adhes. Adhes.*, **1**, 249 (1981).
17. R. M. McClitock, and M. J. Hiza, *Adv. Cryogenic Eng.*, **3**, 305 (1960).
18. C. J. Huang, S. Y. Fu, Y. H. Zhang, B. Lauke, L. F. Li, and L. Ye, *Cryogenics*, **45**, 450 (2005).
19. S. R. Sandler, and F. R. Berg, *J. Appl. Polym. Sci.*, **9**, 3909 (1965).
20. E. P. Plueddemann, *J. Adhes.*, **2**, 184 (1970).
21. J. M. Scott, G. M. Wells, and D. C. Phillips, *J. Mater. Sci.*, **15**, 1436 (1980).
22. A. Yoshimura, T. Takaki, Y. Noji, T. Yokozeki, T. Ogasawara, and S. Ogihara, *J. Adhes. Sci. Technol.*, **26**, 1017 (2012).
23. Emerging Innovations in Adhesive Technologies - Sustainable, Highly Durable, and Cost-effective Adhesives Expected to Rise in Demand Across Applications, Frost&Sullivan (2017).
24. ASTM E 595 - 93, Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials from Outgassing in a Vacuum Environment, American Society for Testing and Materials (1999).
25. R. Pal, S. Sudhi, and R. Raghavan, *J. Appl. Polym. Sci.*, **136**, 47520 (2019).
26. A. K. Gupta, K. V. Kurup, J. Santhanam, and P. Vijendran, *Vacuum*, **27**, 505 (1967).
27. V. Malave, B. Burkiu, B. Riegler, R. Johnson, and R. Thomaier, *J. Spacecraft Rockets*, **48**, 235 (2011).
28. A. H. Hofman, I. A. van Hees, J. Yang, and M. Kamperman, *Adv. Mater.*, **30**, 1704640 (2017).
29. M. J. Sever. J. T. Weisser, J. Monahan, S. Srinivasan, and J. J. Wilker, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **43**, 448 (2004).
30. C. Zhong, T. Gurry, A. A. Cheng, J. Downey, Z. Deng, C. M. Stultz, and T. K. Lu, *Nat. Nanotechnol.*, **9**, 858 (2014).
31. Y. Liu, H. Meng, Z. Qian, N. Fan, W. Choi, F. Zhao, and B. P. Lee, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **56**, 4224 (2017).
32. J. J. Wilker, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **49**, 8076 (2010).
33. M. A. North, C. A. D. Grosso, and J. J. Wilker, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 7866 (2017).
34. A. Cholewinski, F. Yang, and B. Zhao, *Mater. Horiz.*, **6**, 285 (2019) 285-293.
35. S. Baik, J. Kim, H. J. Lee, T. H. Lee, C. Pang, *Adv. Sci.*, **5**, 1800100 (2018).
36. S. Chun, D. W. Kim, S. Baik, H. J. Lee, J. H. Lee, S. H. Bhang, and C. Pang, *Adv. Funct. Mater.*, **28**, 1805224 (2018).
37. S. Baik, D. W. Kim, Y. Par, T. J. Lee, S. H. Bhang, and C. Pang, *Nature*, **546**, 396 (2017).