

Laccase 효소: 식품·음료 안정화, 섬유 염료 탈색, 리그닌 변형 및 환경 바이오공정용 산화효소

Enzymes.bio 연구팀 · 뉴질랜드 웰링턴 · June 17, 2026

Laccase는 구리 중심을 가진 다중구리 산화효소로, 페놀성 화합물·방향족 아민·리그닌 유래 구조를 1전자 산화하고 분자 산소를 물로 환원하는 효소입니다. 이 특성 때문에 식품·음료의 폴리페놀 관리, 섬유 염료 탈색, 펄프·제지, 목질계 바이오매스 전처리, 환경 오염물 변환 같은 산소 기반 산화 공정에서 폭넓게 검토됩니다 [1]. 다만 laccase activity는 기질 구조, pH, 산소 전달, 매트릭스 조성, 매개체 사용 여부에 크게 좌우되므로 “모든 색소·리그닌·플라스틱을 동일하게 분해하는 범용 산화제”로 이해해서는 안 됩니다 [2].

Laccase란 무엇인가: 다중구리 산화효소의 산업적 의미

Laccase enzyme은 산화환원효소 계열에 속하며, 문헌에서는 흔히 blue multicopper oxidase로 설명됩니다. “blue”라는 표현은 효소의 구리 중심과 관련된 분광학적 특성에서 유래하며, 기능적으로는 기질에서 전자를 받아 효소 내부의 구리 중심을 거쳐 산소로 전달한다는 점이 핵심입니다. 산소는 최종적으로 물로 환원되므로, 염소계 산화제나 과격한 화학 산화 조건을 줄이고자 하는 공정에서 laccase가 친환경적 생촉매 후보로 검토됩니다 [2].

Laccase는 곰팡이, 세균, 식물, 곤충 등 다양한 생물에서 발견됩니다. 산업 연구에서는 특히 fungal laccase, 그중 백색부후균 유래 효소가 오래 다뤄져 왔습니다. 백색부후균은 자연계에서 리그닌이 풍부한 목질 조직을 분해하거나 변형하는 대표적 미생물군이며, laccase는 lignin peroxidase, manganese peroxidase와 함께 리그닌 관련 산화 반응에 관여하는 효소군으로 연구되어 왔습니다 [3].

Trametes versicolor laccase는 문헌과 응용 연구에서 자주 언급되는 대표적 fungal laccase입니다. 특정 원료의 효소가 모든 공정에 우월하다는 뜻은 아니지만, 백색부후균 유래 laccase가 리그닌 모델 화합물, 염료, 페놀성 오염물, 폴리페놀성 기질에 대해 많이 연구되어 온 것은 분명합니다. 이 배경 때문에 “*trametes versicolor* laccase”, “fungal laccase”, “laccase review” 같은 검색어는 섬유·환경·바이오리파이너리 분야에서 자주 함께 나타납니다 [1].

세균 유래 laccase도 별도의 장점을 갖습니다. "laccase enzyme production from bacteria"나 bacterial alkaline laccase를 검색하는 사용자는 보통 더 넓은 pH 안정성, 알칼리 조건, 환경 처리 적용 가능성을 염두에 둡니다. 실제로 세균성 알칼리 laccase는 환경 응용에서 관심을 받아 왔으며, 곰팡이 laccase와는 다른 조건 적합성을 보일 수 있습니다 [4].

Laccase structure와 laccase mechanism: 산소를 이용한 1전자 산화

Laccase mechanism은 "기질 산화"와 "산소 환원"이 효소 내부에서 연결되는 과정으로 설명할 수 있습니다. 기질은 효소의 산화 부위에서 전자 하나를 잃고 라디칼 또는 산화 중간체가 됩니다. 이 전자는 효소의 구리 중심 네트워크를 통해 전달되고, 여러 전자가 축적된 뒤 분자 산소가 물로 환원됩니다. 따라서 laccase 반응에는 산소 접근성이 중요하며, 산소 전달이 제한된 점성 매트릭스나 밀폐 시스템에서는 반응 효율이 낮아질 수 있습니다 [2].

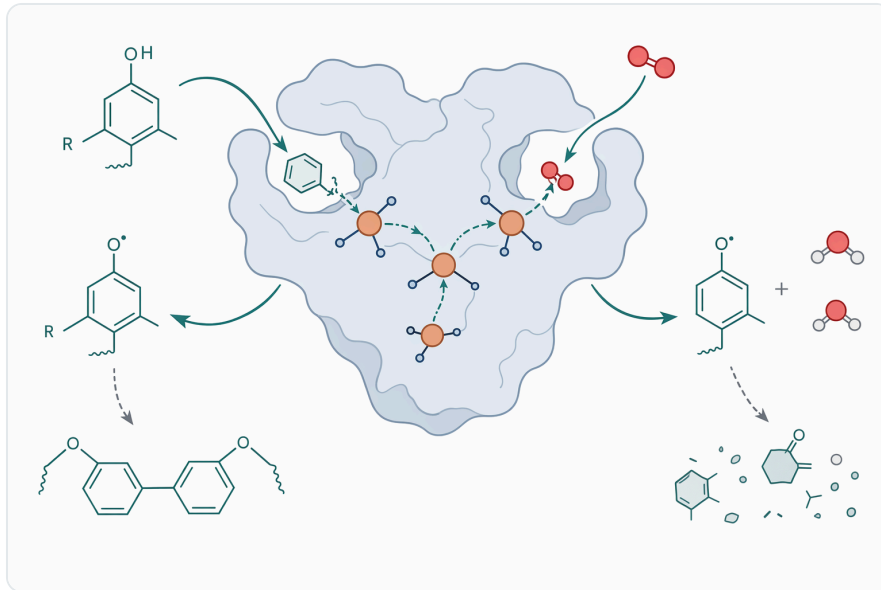


Figure 1. 라카아제는 페놀성 기질의 1전자 산화를 촉매하면서 산소를 물로 환원합니다.

Laccase structure에서 중요한 요소는 구리 중심의 배열입니다. 여러 laccase review는 효소가 구리 원자를 포함하는 산화환원 중심을 통해 기질 산화와 산소 환원을 결합한다고 설명합니다. 이 구조적 특징은 laccase가 과산화수소를 필수 보조기질로 요구하는 peroxidase류와 구분되는 지점입니다. 즉, laccase는 산소를 직접 전자 수용체로 활용한다는 점에서 공정 설계상 장점이 있지만, 그만큼 반응액 내 산소 공급과 혼합 상태가 성능에 영향을 줍니다 [5].

기질이 산화된 뒤에는 여러 경로가 가능합니다. 첫째, 페놀성 라디칼이 서로 결합해 중합체나 가교 구조를 만들 수 있습니다. 둘째, 염료 분자의 발색단 구조가 변형되어 색이 약해지거나 분해 경로로 진입할 수 있습니다. 셋째, 리그닌 유래 구조가 산화되어 고분자 네트워크의 표면 특성, 용해성, 후속

효소 접근성이 바뀔 수 있습니다. 이처럼 laccase substrate는 단순한 "분해 대상"만이 아니라 산화 후 중합, 결합, 침전, 탈색, 구조 변형을 모두 일으킬 수 있는 반응성 분자군으로 이해해야 합니다 [1].

비페놀성 구조나 큰 고분자 기질은 laccase 단독으로 접근하기 어렵거나 산화전위가 충분하지 않을 수 있습니다. 이때 laccase-mediator system이 연구됩니다. 매개체는 laccase가 먼저 산화한 작은 분자로, 이후 더 큰 분자나 직접 산화가 어려운 기질에 산화력을 전달합니다. 이 접근은 적용 범위를 넓힐 수 있지만, 매개체의 비용, 잔류성, 독성, 제품 품질 영향, 규제 적합성을 함께 고려해야 하므로 모든 식품·환경 공정에 자동으로 적용되는 방법은 아닙니다 [3].

Laccase molecular weight와 효소 출처: 수치보다 중요한 것은 공정 적합성

"laccase molecular weight"는 사용자가 자주 찾는 정보이지만, 산업 적용에서 분자량 숫자 하나만으로 성능을 판단하기는 어렵습니다. laccase의 분자량, 당화 정도, 등전점, 구리 중심 환경, 표면 전하, 열·pH 안정성은 미생물 출처와 생산·정제 배경에 따라 달라질 수 있습니다. 따라서 laccase structure와 분자량은 효소를 이해하는 데 유용하지만, 실제 공정 성능은 기질 접근성, 산소 전달, 억제물 존재, 반응 생성물의 거동과 함께 평가되어야 합니다 [2].

Fungal laccase는 리그닌 변형, 염료 탈색, 페놀성 화합물 산화 연구에서 풍부한 문헌 기반을 갖습니다. 반면 bacterial alkaline laccase는 알칼리성 폐수나 특정 환경 조건에서 관심을 받습니다. 둘 중 하나가 절대적으로 우수하다기보다, 처리 대상이 산성 음료인지, 중성 수계인지, 알칼리성 섬유 폐수인지, 고형분이 많은 바이오매스 슬러리인지에 따라 적합성이 달라집니다 [4].

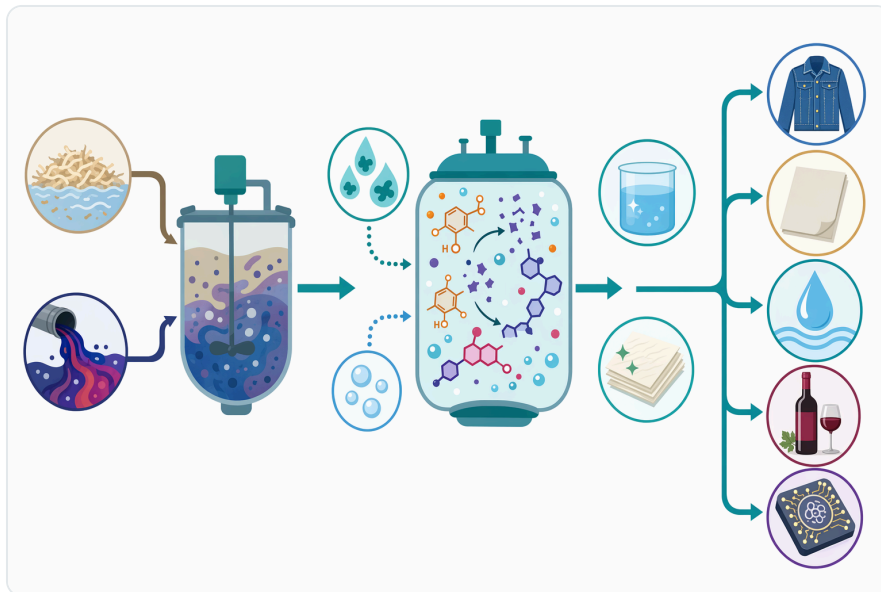


Figure 2. 산업용 라카아제 공정은 산소 기반 산화를 이용해 리그닌, 염료, 페놀류 및 기타 방향족 화합물을 변형합니다.

효소 고정화 연구도 출처와 구조적 안정성의 차이를 보완하려는 접근입니다. biochar, chitosan bead, titania nanoparticle, carbonaceous support, metal-organic framework 같은 지지체에 laccase를 고정화하면 효소 회수성, 반복 사용성, 열·pH 안정성, 오염물 처리 지속성을 개선할 수 있다는 연구가 축적되어 있습니다 [6]. 다만 고정화 효소는 지지체 비용, 확산 제한, 반응기 설계, 기질 크기, 탈착 또는 비활성화 문제를 함께 고려해야 하므로, 분말 효소와 동일한 방식으로 해석해서는 안 됩니다 [7].

주요 응용 영역 비교: 어디에서 laccase가 특히 유용한가

Laccase는 매우 넓은 분야에서 언급되지만, 근거 수준과 공정 성숙도는 분야마다 다릅니다. 식품·음료에서는 폴리페놀 산화와 색·탁도 안정화가 중심이고, 섬유·환경 분야에서는 염료와 방향족 오염물의 산화적 변환이 중심입니다. 펄프·제지와 바이오피라이너리에서는 리그닌 변형, 탈리그닌 보조, 목질계 바이오매스 전처리와 연결됩니다 [1].

응용 분야	주요 기질 또는 문제	laccase가 유도하는 변화	근거와 주의점
식품·음료	폴리페놀, 산화성 페놀, 색·탁도 관련 성분	산화, 중합, 침전 가능성, 색 안정화 보조	식품·음료 응용은 리뷰에서 반복적으로 다루지지만, 원료별 품질 목표가 중요함 [1]
제빵·식품 구조	곡물계 페놀성 성분, 단백질·다당류 네트워크	산화적 결합, 반죽 물성 변화 가능성	원료 조성, 수분, 산화환원 조건에 따라 효과가 달라짐 [2]
섬유 염료 탈색	아조, 안트라퀴논, 인디고계 등 다양한 염료	발색단 산화, 색 감소, 후속 분해 경로 유도	단일 염료 실험과 실제 폐수 성능은 다를 수 있음 [8]
산업 폐수·환경 정화	페놀성 오염물, 방향족 화합물, 일부 난분해성 물질	산화적 변환, 독성 또는 색도 감소 가능성	염, 계면활성제, 금속, pH 변동이 성능을 좌우함 [9]
펄프·제지	리그닌 및 리그닌 유래 구조	리그닌 표면 산화, 탈리그닌 보조, 표백 보조 가능성	매개체와 조합될 때 적용 범위가 넓어질 수 있음 [3]
바이오피라이너리	밀짚, 농업 부산물, 목질계 바이오매스	리그닌 변형, 당화 접근성 변화 가능성	전처리 이력, 고형분, 산소 전달, 효소 조합이 중요함 [10]
바이오센서·전극	페놀, 염료, 산소 환원 반응	전기화학 신호 또는 바이오캐소드 기능	소재·전극 안정화 연구와 산업 효소 사용은 구분 필요 [11]

이 표에서 보듯 laccase의 공통 기반은 산화 반응이지만, 공정 목표는 서로 다릅니다. 음료에서는 불필요한 폴리페놀 반응성을 줄이는 것이 목표일 수 있고, 섬유에서는 색을 없애는 것이 목표이며, 리그닌 공정에서는 고분자 구조를 더 접근 가능하게 만드는 것이 목표일 수 있습니다. 따라서 같은 laccase enzyme이라도 “얼마나 많이 반응했는가”보다 “원하는 품질 지표가 어떤 방향으로 변했는가”가 더 중요합니다 [2].

식품·음료 공정: 폴리페놀 관리와 안정화

식품·음료 분야에서 laccase의 가장 직관적인 역할은 페놀성 물질의 산화입니다. 과일 주스, 와인, 맥주, 식물성 추출물에는 폴리페놀과 산화성 방향족 성분이 존재하며, 이들은 색 변화, 탁도, 침전, 저장 중 풍미 변화와 관련될 수 있습니다. Laccase는 이러한 물질을 산화해 중합 또는 침전되기 쉬운 형태로 바꾸거나, 색·탁도 안정화 공정의 일부로 사용될 수 있습니다 [1].

다만 식품 매트릭스에서 laccase 반응은 단순한 “페놀 제거”가 아닙니다. 산화된 페놀은 단백질, 다당류, 다른 페놀성 물질과 결합할 수 있고, 그 결과 침전이나 색 변화가 나타날 수 있습니다. 어떤 제품에서는 이것이 바람직한 안정화 효과일 수 있지만, 다른 제품에서는 향미 손실이나 색상 변화로 이어질 수 있습니다. 따라서 식품·음료 응용에서는 원료의 폴리페놀 조성, 산소 노출, 후속 여과 또는 열처리 조건을 함께 이해해야 합니다 [2].

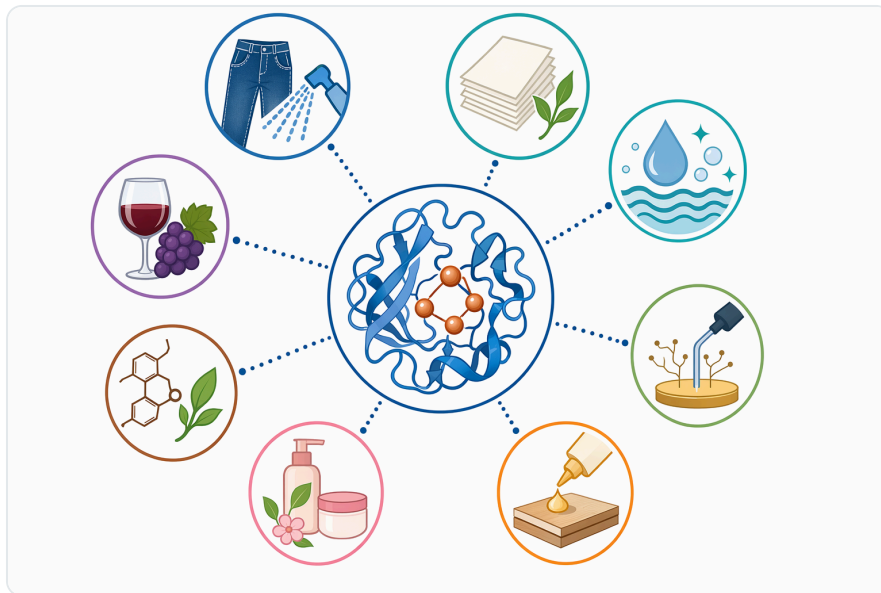


Figure 3. 라카아제는 섬유, 펄프 및 제지, 환경 처리, 식음료 가공, 바이오 기반 소재 등 다양한 분야에서 사용됩니다.

제빵 및 곡물 기반 식품에서는 laccase가 반죽 물성 조절과 연결됩니다. 곡물에는 페놀성 성분과 산화적으로 반응할 수 있는 고분자 네트워크가 존재하며, laccase 반응은 반죽의 점착성, 탄성, 가공성을 변화시킬 가능성이 있습니다. 이 응용은 특히 식물성 원료 비율이 높거나, 섬유질이 많은 원료를 사용하는 제품에서 관심을 받을 수 있습니다 [1].

섬유 염료 탈색과 폐수 처리: 발색단 산화의 가능성과 한계

섬유 산업에서 laccase가 많이 연구되는 이유는 염료 분자가 대체로 방향족 구조와 공액계를 갖기 때문입니다. 색은 발색단의 전자 구조에서 나오며, laccase가 이 구조를 산화적으로 변화시키면 색도가 낮아질 수 있습니다. Kandelbauer의 고정화 laccase 효소 반응기 연구처럼, 온라인 분광 모니터링을 이용한 염료 탈색 사례는 laccase가 염료 처리에서 실제 공정 형태로 검토되어 왔음을 보여줍니다 [8].

염료 탈색 연구에서는 고정화가 자주 등장합니다. 효소를 담체에 고정하면 반응기 내 체류, 반복 사용, 처리 연속성 측면에서 장점이 있을 수 있습니다. 예를 들어 titania nanoparticle에 laccase를 고정화해 단일 및 혼합 염료 시스템의 탈색을 다룬 연구는 무기 나노지지체가 효소 안정화와 염료 처리에 활용될 수 있음을 보여줍니다 [12]. Chitosan bead에 fungal laccase를 고정화한 연구 역시 bisphenol A나 섬유 염료 같은 환경성 기질 분해에서 고정화 접근이 활용될 수 있음을 제시합니다 [13].

하지만 실제 섬유 폐수는 단일 염료 용액이 아닙니다. 염, 계면활성제, 균염제, 금속, 고농도 유기물, pH 변동, 여러 염료의 혼합물이 함께 존재할 수 있습니다. 이런 구성 요소는 laccase의 산화 반응을 억제하거나, 반대로 흡착·침전과 결합해 색도 변화를 복잡하게 만들 수 있습니다. 따라서 laccase는 단독 만능 처리제가 아니라 생물학적 처리, 흡착, 응집, 막분리, 고도산화 등과 조합 가능한 생촉매 옵션으로 이해하는 편이 현실적입니다 [9].

리그닌 변형, 펄프·제지, 바이오리파이너리

리그닌은 페닐프로판 단위가 복잡하게 연결된 방향족 고분자이며, 목질계 바이오매스에서 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스 접근성을 제한합니다. Laccase는 리그닌의 페놀성 구조를 산화할 수 있기 때문에 펄프·제지, 표백 보조, 농업 부산물 전처리, 바이오리파이너리 공정에서 연구되어 왔습니다 [3].

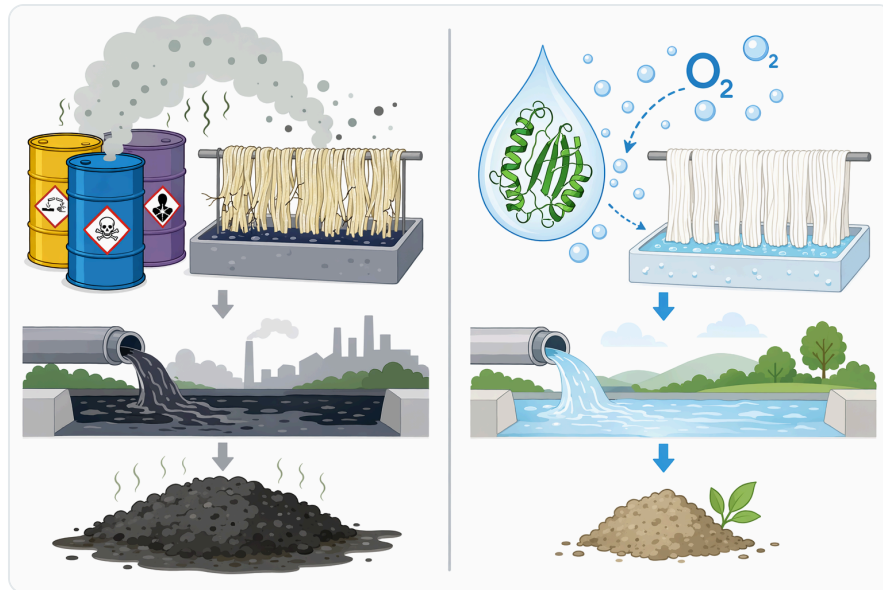


Figure 4. 강한 화학적 산화 처리와 비교할 때, 라카아제 처리는 방향족 기질을 선택적으로 산화하면서 화학물질 사용량을 줄일 수 있습니다.

밀짚 전처리 연구는 laccase가 바이오매스의 물리화학적 특성과 후속 효소 당화에 영향을 줄 수 있음을 보여주는 대표적 예입니다. laccase pretreatment는 단순히 리그닌을 “없애는” 과정이라기보다, 리그닌의 산화 상태와 구조, 표면 특성, 효소 접근성을 변화시키는 과정으로 이해해야 합니다 [10]. 원료의 입자 크기, 전처리 이력, 수분, 고형분, 산소 전달 조건에 따라 결과가 달라지는 이유도 여기에 있습니다.

Laccase–mediator system은 리그닌 분야에서 특히 중요합니다. 리그닌에는 laccase가 직접 산화하기 쉬운 페놀성 구조뿐 아니라 비페놀성 구조도 많습니다. 매개체는 laccase의 산화력을 더 접근하기 어려운 구조로 전달해 적용 범위를 넓힐 수 있습니다. 그러나 매개체 기반 공정은 비용, 부산물, 후처리, 환경성 평가가 함께 필요하므로, 리그닌 변형 효과만 보고 쉽게 일반화하기 어렵습니다 [3].

바이오피파이너리 관점에서는 laccase가 폐기물 가치화에도 연결됩니다. 농산 부산물, 밀짚, 목질계 폐기물, 식품 산업 잔사는 리그닌과 페놀성 성분을 포함하며, 이들을 더 높은 가치의 당, 화학품, 기능성 소재로 전환하려면 산화적 전처리나 구조 변형이 필요할 수 있습니다. Laccase는 이러한 저자극 산화 공정의 하나로 검토되지만, 당화 효율 향상·리그닌 가치화·폐수 부하 감소 중 어떤 목표를 우선할지에 따라 공정 설계가 달라집니다 [3].

환경 정화: 페놀성 오염물, PAHs, BPA, 난분해성 물질

환경 분야에서 laccase는 페놀성 오염물, 염료, 내분비계 교란물질, 다환방향족탄화수소(PAHs) 같은 방향족 오염물의 산화적 변환에 활용 가능성이 연구되어 왔습니다. Recombinant laccase from thermoalkaliphilic *Bacillus* sp. FNT에 대한 생화학·분광학적 특성 연구는 PAHs 분해 가능성을 다루며, 세균성 laccase가 환경 오염물 처리에 응용될 수 있음을 보여줍니다 [14].

Bisphenol A 처리도 laccase 연구에서 자주 등장하는 사례입니다. Glutaraldehyde로 가교한 chitosan bead에 fungal laccase를 고정화한 연구는 BPA 분해를 위한 생촉매 시스템을 제시했습니다. 이런 연구는 laccase가 단순히 식품·섬유 분야에만 국한되지 않고, 페놀성 구조를 가진 환경 오염물 변환에도 적용될 수 있음을 보여줍니다 [13].

최근 "laccase plastic degradation"이라는 검색어도 늘고 있습니다. 다만 플라스틱 분해는 염료 탈색이나 페놀성 오염물 산화보다 훨씬 복잡한 영역입니다. 플라스틱은 결정성, 소수성, 고분자 사슬 접근성, 첨가제, 산화 전처리 여부에 따라 반응성이 크게 달라집니다. 따라서 laccase plastic degradation은 연구적 가능성으로 언급할 수는 있지만, 현재 산업적으로 검증된 범용 플라스틱 분해 솔루션으로 받아들이는 것은 신중해야 합니다. 환경 정화 리뷰에서도 laccase는 유망한 생촉매로 평가되지만, 실제 적용은 오염물 구조와 공정 조건에 강하게 의존한다고 정리됩니다 [9].

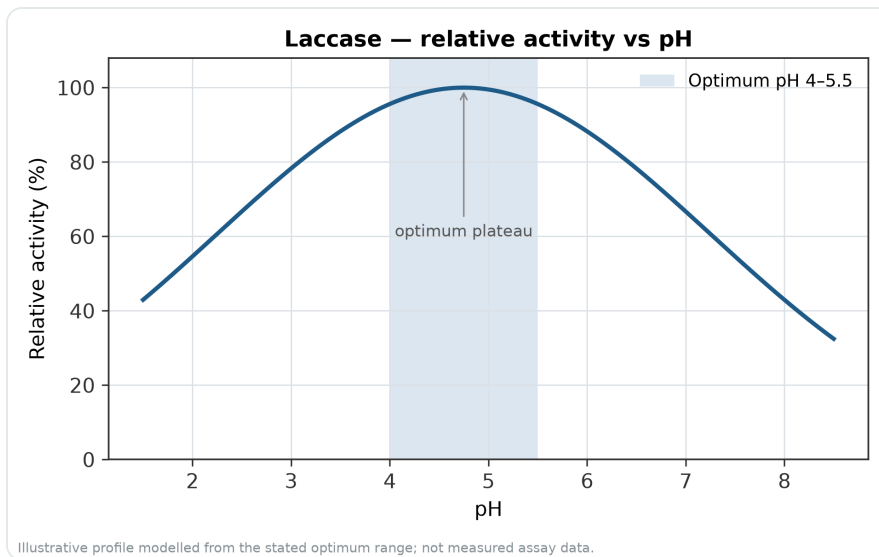


Figure 5. pH에 따른 라카아제의 상대 활성으로, pH 4-5.5에서 최적 활성 구간이 나타납니다.

고정화 laccase: 안정성, 재사용성, 반응기 적용

효소 고정화는 laccase 응용에서 가장 활발한 기술 축 중 하나입니다. 자유 효소는 액상에서 기질과 빠르게 접촉할 수 있지만, 회수와 재사용이 어렵고, pH·온도·용매·오염물에 의해 비활성화될 수 있습니다. 반면 고정화 효소는 지지체 표면이나 내부에 효소를 결합해 안정성과 공정 취급성을 높이는 전략입니다 [5].

Biochar 기반 고정화 연구는 표면 개질과 효소 안정성 개선의 예를 제공합니다. CTAB-KOH modified biochar에 laccase를 고정화한 연구는 탄소 기반 지지체가 효소 안정성과 환경 응용 가능성을 높이는 방향으로 설계될 수 있음을 보여줍니다 [6]. 탄소계 지지체에 대한 비판적 리뷰 역시 활

성탄, 바이오차, 탄소나노소재 등이 환경 응용에서 laccase 고정화 플랫폼으로 검토되어 왔다고 정리합니다 [7].

Chitosan, titania nanoparticle, metal-organic framework(MOF)도 대표적인 지지체입니다. Chitosan bead는 생체고분자 기반 지지체로 효소 결합과 수계 반응에 활용되며, titania nanoparticle은 무기 표면 특성을 이용한 고정화 연구에 등장합니다 [12]. MOF 기반 고정화는 다공성 구조와 표면 기능을 활용해 효소 보호, 기질 접근성, 안정성 향상을 목표로 하며, laccase-focused review에서 최근 연구 흐름으로 다뤄집니다 [5].

다만 고정화가 항상 더 좋은 것은 아닙니다. 지지체 내부 확산 제한 때문에 큰 기질이나 고분자 리그닌은 효소 활성 부위에 접근하기 어려울 수 있습니다. 효소가 지지체에 너무 강하게 결합하면 구조적 유연성이 줄어들 수 있고, 반대로 너무 약하게 결합하면 운전 중 탈착이 일어날 수 있습니다. 따라서 고정화 laccase는 안정성과 재사용성을 얻는 대신, 반응 속도와 기질 접근성에서 절충이 발생할 수 있는 기술로 봐야 합니다 [15].

Laccase activity를 해석할 때의 핵심 변수

Laccase activity는 제품이나 논문에서 단일 숫자로 표현되기 쉽지만, 실제 공정 성능은 단순하지 않습니다. 같은 효소라도 사용한 기질, pH, 온도, 산소 조건, 반응 시간, 억제물 존재, 매트릭스 구성에 따라 관찰되는 반응성이 달라집니다. 특히 실제 음료, 폐수, 바이오매스 슬러리에서는 표준 기질 반응과 품질 지표 변화가 일치하지 않을 수 있습니다 [2].

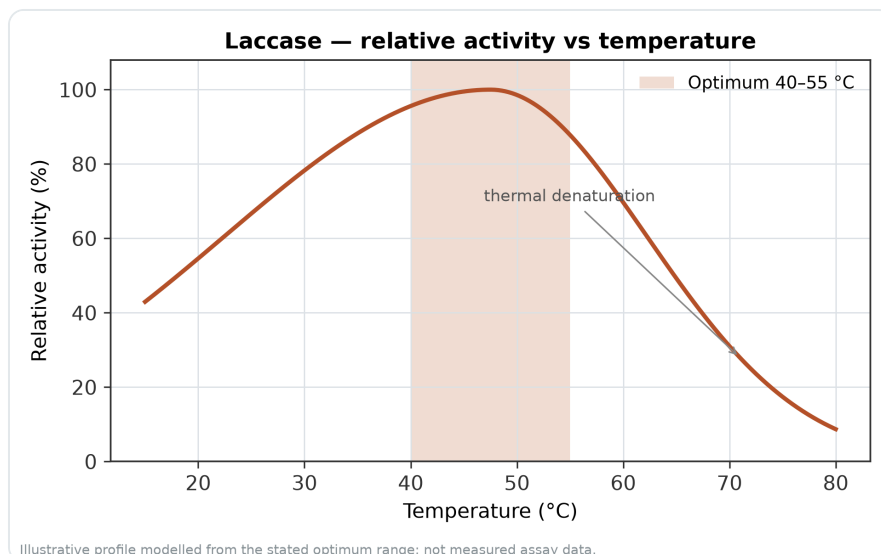


Figure 6. 온도에 따른 라카아제의 상대 활성으로, 40–55°C에서 최적 활성을 보이며 최적 온도를 넘으면 열 변성에 따른 전형적인 활성 감소가 나타납니다.

pH는 laccase 성능에 큰 영향을 줍니다. Fungal laccase는 산성 조건에서 자주 연구되지만, 모든 곰팡이 laccase가 같은 pH 범위를 갖는 것은 아닙니다. 반대로 bacterial alkaline laccase는 알칼리 조건에서 관심을 받지만, 특정 세균성 효소가 모든 알칼리 폐수에 적합하다는 뜻도 아닙니다. 효소 출처와 공정 pH가 맞지 않으면 기질 산화보다 효소 비활성화가 더 빠르게 진행될 수 있습니다 [4].

온도와 산소 전달도 중요합니다. 온도가 높아지면 반응 속도가 증가할 수 있지만 효소 안정성은 낮아질 수 있습니다. 산소는 laccase 반응의 최종 전자 수용체이므로, 점도가 높은 슬러리, 고형분이 많은 바이오매스, 깊은 탱크, 거품을 제한해야 하는 음료 공정에서는 산소 전달이 병목이 될 수 있습니다. 따라서 laccase를 사용할 때는 효소 자체뿐 아니라 혼합, 표면적, 공기 접촉, 반응기 구조가 함께 성능을 좌우합니다 [2].

억제물과 경쟁 기질도 고려해야 합니다. 실제 폐수나 천연 원료에는 laccase가 산화할 수 있는 물질이 여러 종류 존재합니다. 목표 기질보다 더 쉽게 산화되는 물질이 있으면 효소 반응이 그쪽으로 분산될 수 있고, 금속 이온이나 계면활성제, 고농도 염, 천연 유기물은 효소 구조나 기질 접근성에 영향을 줄 수 있습니다. Humic acid가 laccase 촉매 시스템 성능을 여러 메커니즘으로 낮출 수 있다는 연구는 천연 유기물 매트릭스가 효소 공정에서 중요한 변수임을 보여줍니다 [16].

Laccase 응용에서 기대할 수 있는 장점

Laccase의 가장 큰 장점은 산소 기반 산화 반응입니다. 산소를 전자 수용체로 사용하고 물을 생성하는 반응 특성은 강한 화학 산화제를 줄이고자 하는 공정에서 매력적입니다. 특히 색, 냄새, 탁도, 페놀성 반응성, 리그닌 구조처럼 산화환원 상태와 밀접한 품질 지표를 다루는 분야에서 laccase는 공정 친화적 대안으로 검토될 수 있습니다 [1].

두 번째 장점은 기질 범위입니다. Laccase substrate는 특정 단일 화합물에 국한되지 않고, 다양한 페놀성 화합물, 방향족 아민, 리그닌 모델 화합물, 일부 염료와 오염물까지 포함합니다. 이 낮은 기질 특이성은 복잡한 천연 원료나 폐수에서 장점이 될 수 있습니다. 다만 같은 이유로 선택성이 낮아 원하지 않는 부반응이 생길 수도 있으므로, "넓은 기질 범위"는 장점이자 설계 변수입니다 [2].

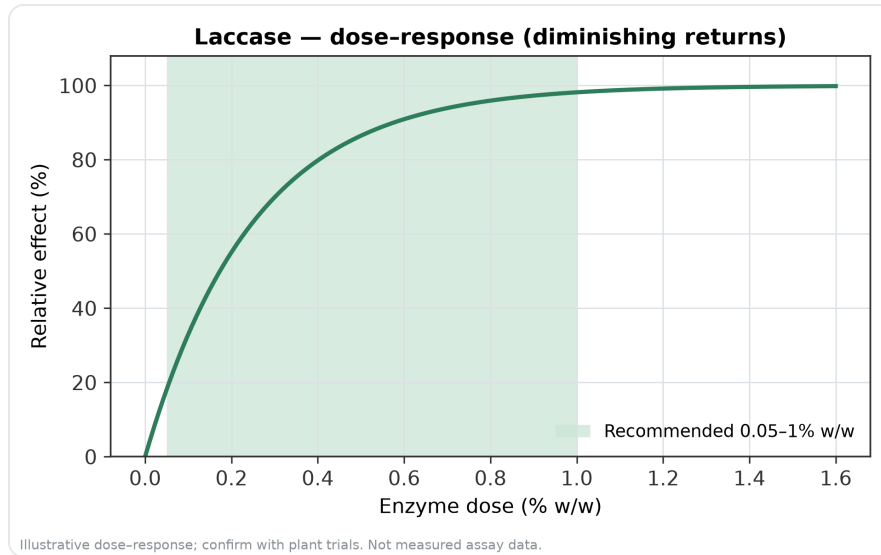


Figure 7. 권장 사용 범위(0.05-1% w/w)에서 라카아제의 예시적 용량-반응 관계입니다.

세 번째 장점은 공정 조합 가능성입니다. Laccase는 흡착, 여과, 응집, 미생물 처리, 다른 효소, 매개체, 고정화 지지체와 결합해 사용할 수 있습니다. 예를 들어 염료 폐수에서는 laccase가 발색단을 먼저 산화하고, 후속 생물학적 처리나 흡착 공정이 잔류 유기물을 낮추는 방식이 가능합니다. 리그닌 공정에서는 laccase가 표면을 산화해 이후 당화 효소나 화학 전환 공정의 접근성을 바꿀 수 있습니다 [7].

명확한 한계: laccase가 해결하지 못하는 것들

Laccase는 강력한 생축매 후보지만 만능 산화제가 아닙니다. 첫째, 비페놀성 기질과 고분자 기질은 laccase 단독으로 반응성이 낮을 수 있습니다. 둘째, 산화된 기질이 항상 “분해”되는 것은 아니며, 오히려 중합·침전·가교가 일어날 수 있습니다. 셋째, 매개체를 사용하면 반응 범위가 넓어질 수 있지만, 매개체 자체의 환경성·잔류성·비용 문제가 생깁니다 [3].

둘째, 복합 매트릭스에서는 성능 예측이 어렵습니다. 실험실에서 단일 염료가 잘 탈색되었다고 해서 실제 섬유 폐수가 같은 비율로 처리되는 것은 아닙니다. 마찬가지로 모델 페놀 화합물의 산화 결과가 실제 과일 주스, 와인, 식물 추출물의 색·향·탁도 변화와 그대로 일치하지 않을 수 있습니다. 실제 시스템에서는 경쟁 기질, 억제물, 산소 전달, 반응 생성물의 침전과 재용해가 동시에 일어납니다 [16].

셋째, 난분해성 고분자와 플라스틱에 대해서는 신중한 해석이 필요합니다. laccase plastic degradation이라는 표현은 연구적으로 흥미롭지만, 플라스틱의 주사슬 절단, 표면 산화, 첨가제 변환, 미세플라스틱 표면 개질은 서로 다른 현상입니다. 현재 근거가 더 탄탄한 영역은 페놀성 오염물, 염료, 리그닌 관련 구조의 산화적 변환이며, 플라스틱 분해는 재질·전처리·공정 조건에 따라 크게 달라지는 연구 영역으로 보는 것이 타당합니다 [9].

Enzymes.bio에서 공급되는 laccase의 위치

Enzymes.bio는 laccase를 포함한 효소 원료를 온라인으로 공급하는 B2B 공급업체입니다.

Enzymes.bio는 제조사나 실험실이 아니라 공급업체이며, laccase 제품은 1kg 단위로 온라인 직접 주문할 수 있는 형태로 제공됩니다. CoA와 SDS는 주문 시 함께 제공되므로, 구매자는 입고 후 내부 품질 문서 관리와 안전 취급 절차에 반영할 수 있습니다.

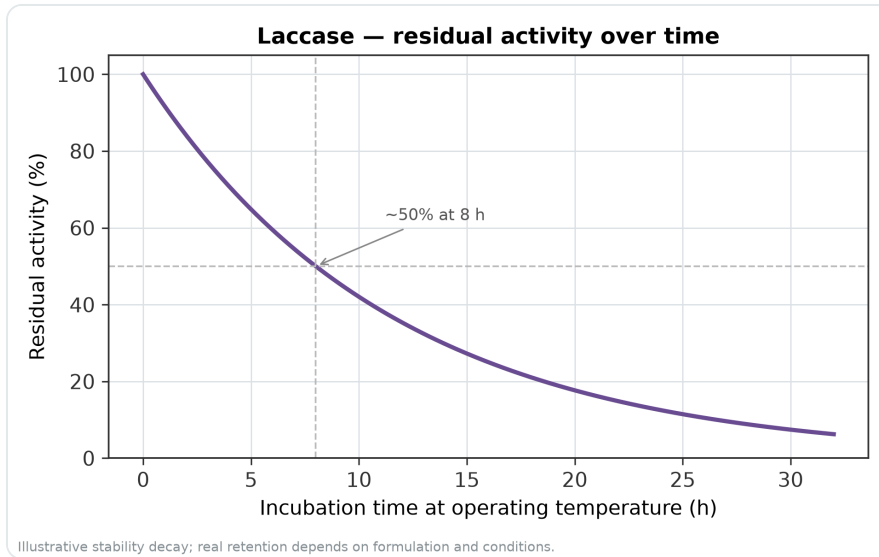


Figure 8. 운전 온도에서 시간이 지남에 따라 잔존 활성이 감소하는 라카아제의 예시적 열 안정성 감소입니다.

이 문서의 목적은 특정 제조 조건이나 분석법을 제시하는 것이 아니라, laccase enzyme이 어떤 반응 원리로 작동하고 어떤 산업 문제와 연결되는지 설명하는 것입니다. 제품을 검토하는 실무자는 laccase를 "색을 없애는 효소" 또는 "리그닌을 분해하는 효소"처럼 단일 기능으로만 보지 말고, 페놀성 산화, 라디칼 형성, 중합·가교, 발색단 변형, 리그닌 표면 산화, 오염물 전환을 유도할 수 있는 산화환원 생촉매로 이해하는 것이 좋습니다 [2].

최종 정리: laccase를 공정 언어로 이해하기

Laccase는 구리 중심을 가진 산소 의존성 산화효소로, 페놀성 화합물과 다양한 방향족 기질을 1전자 산화해 색, 탁도, 반응성, 고분자 구조, 오염물 거동을 바꿀 수 있습니다. 이 때문에 식품·음료 안정화, 제빵 물성 조절, 섬유 염료 탈색, 펄프·제지, 리그닌 변형, 바이오리파이너리, 환경 정화에서 폭넓게 연구되어 왔습니다 [1].

가장 근거가 탄탄한 적용 축은 페놀성 물질 산화, 염료 탈색, 리그닌 관련 구조 변형, 고정화 기반 환경 처리입니다. 반면 비페놀성 고분자, 플라스틱, 매우 안정한 난분해성 오염물은 매개체, 전처리, 공정 조합이 필요한 경우가 많고, 아직 적용 조건별 검증이 중요한 영역입니다 [9].

따라서 laccase를 선택할 때의 핵심 질문은 “이 효소가 강한가”가 아니라 “내 공정의 목표 기질이 laccase substrate 범위에 들어가며, 산소·pH·매트릭스·후속 분리 조건이 원하는 방향의 산화 반응을 허용하는가”입니다. 이 관점에서 laccase는 단순 첨가제가 아니라, 색 안정화·탈색·가교·리그닌 변형·오염물 전환을 설계할 수 있는 산업용 산화환원 생촉매로 자리 잡습니다 [2].

Laccase 온라인 주문

1kg 단위로 판매되며 재고 보유, 즉시 출고됩니다. 온라인 스토어에서 바로 결제하시면 주문을 처리해 드립니다. 모든 주문에는 시험성적서(CoA)와 물질안전보건자료(SDS)가 포함됩니다.

Laccase 구매하기 →

참고문헌

최초 인용 순서로 번호를 매겼습니다. 모든 출처는 발행 시점에 접근 가능 여부를 확인한 오픈 액세스 자료이며, 본문의 인용 번호가 이곳으로 연결됩니다.

1. Khatami, S. H., Vakili, O., Movahedpour, A., Ghesmati, Z., Ghasemi, H., & Taheri-Anganeh, M. (2022). Laccase: Various types and applications. *Biotechnology and applied biochemistry*, 69, 2658 - 2672.
2. Kyomuhimbo, H. D., & Brink, H. G. (2023). Applications and immobilization strategies of the copper-centred laccase enzyme; a review. *Heliyon*, 9.
3. Singh, G., Kumar, S., Afreen, S., Bhalla, A., Khurana, J., Chandel, S., Aggarwal, A., ... et al. (2023). Laccase mediated delignification of wasted and non-food agricultural biomass: Recent developments and challenges. *International Journal of Biological Macromolecules*, 123840 .
4. Bacterial Alkaline Laccase and Its Environmental Applications. *Semantic Scholar* (2017).
5. Alvarado-Ramírez, L., Machorro-García, G., López-Legarrea, A., Trejo-Ayala, D., Jesús Rostro-Alanis, M., Sánchez-Sánchez, M., Martín, R., ... et al. (2023). Metal-organic frameworks for enzyme immobilization and nanozymes: A laccase-focused review. *Biotechnology Advances*, 108299 .
6. Wang, Z., Ren, D., Li, Z., Yu, H., Zhang, S., Zhang, X., & Chen, W. (2021). The study of laccase immobilization optimization and stability improvement on CTAB-KOH modified biochar. *BMC Biotechnology*, 21.
7. Adamian, Y., Lonappan, L., Alokpa, K., Agathos, S., & Cabana, H. (2021). Recent Developments in the Immobilization of Laccase on Carbonaceous Supports for Environmental Applications - A Critical Review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9.
8. Kandelbauer, A., Maute, O., Kessler, R., Erlacher, A., & Gübitz, G. (2004). Study of dye decolorization in an immobilized laccase enzyme-reactor using online spectroscopy. *Biotechnology and Bioengineering*, 87.

9. Younus, H., Khan, M. A., Khan, A., & Alhumaydhi, F. (2025). Eco-Friendly Biocatalysts: Laccase Applications, Innovations, and Future Directions in Environmental Remediation. *Catalysts*.
10. Deng, Z., Xia, A., Liao, Q., Zhu, X., Huang, Y., & Fu, Q. (2019). Laccase pretreatment of wheat straw: effects of the physicochemical characteristics and the kinetics of enzymatic hydrolysis. *Biotechnology for Biofuels*, 12.
11. Hakamada, M., Takahashi, M., & Mabuchi, M. (2012). Enzyme electrodes stabilized by monolayer-modified nanoporous Au for biofuel cells. *Gold Bulletin*, 45, 9-15.
12. Mohajershojaji, K., Mahmoodi, N. M., & Khosravi, A. (2015). Immobilization of laccase enzyme onto titania nanoparticle and decolorization of dyes from single and binary systems. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 20, 109-116.
13. Bilal, M., Jing, Z., Zhao, Y., & Iqbal, H. M. (2019). Immobilization of fungal laccase on glutaraldehyde cross-linked chitosan beads and its bio-catalytic potential to degrade bisphenol A. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*.
14. Bueno-Nieto, C., Cortés-Antíquera, R., Espina, G., Atalah, J., Villanueva, J., Aliaga, C., Zúñiga, G., ... et al. (2023). Biochemical and Spectroscopic Characterization of a Recombinant Laccase from Thermoalkaliphilic Bacillus sp. FNT with Potential for Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). *Catalysts*.
15. Zimmermann, Y., Shahgaldian, P., Corvini, P., & Hommes, G. (2011). Sorption-assisted surface conjugation: a way to stabilize laccase enzyme. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 92, 169-178.
16. Lopes, J., Marques-Silva, D., Peralta, C., Rodrigues, J., Vaz, D., & Lagoa, R. (2025). Humic acid aggregates with laccase and decreases the performance of the enzyme catalytic systems through various mechanisms. *International Journal of Biological Macromolecules*, 146405 .


Enzymes.bio 문의

주문에 관해 궁금한 점이 있으신가요? 기꺼이 도와드리겠습니다.


이메일 wholesale@enzymes.bio

전화 (미국) +1 (507) 428-6057

문의하기 →

 400+ B2B 고객사

 60+ 대학 연구 파트너

 54 전 세계 54개국 공급

© 2026 Enzymes.bio · 산업용 및 식품 가공용 효소 공급 · 인체 섭취 또는 소매 판매용이 아님