

제지·펄프 산업용 셀룰라아제 효소: 탈묵, 배수 개선, 리파이닝 보조 및 폐지 슬러지 자원화

Enzymes.bio 연구팀 · 뉴질랜드 웰링턴 · June 18, 2026

셀룰라아제는 제지·펄프 공정에서 셀룰로오스 섬유 표면의 β -1,4-글리코시드 결합을 제한적으로 절단해 탈묵, 배수성 개선, 리파이닝 보조, 섬유 개질에 활용되는 효소군입니다. 핵심은 섬유를 완전히 당화하는 것이 아니라, 잉크·미세분·표면 피브릴과 섬유 매트릭스의 상호작용을 조절해 공정 효율을 높이는 “부분적 표면 개질”입니다. Enzymes.bio는 제조사나 실험실이 아니라 효소 공급업체이며, 제지·펄프용 셀룰라아제 제품은 1kg 단위로 온라인 직접 구매할 수 있고 주문 시 CoA와 SDS가 함께 제공됩니다.

제지·펄프용 셀룰라아제의 정의와 산업적 위치

제지·펄프 산업에서 말하는 셀룰라아제는 보통 하나의 단일 단백질이 아니라, 셀룰로오스 사슬의 서로 다른 위치에 작용하는 효소들의 기능적 묶음으로 이해됩니다. 대표적으로 엔도글루카나아제는 셀룰로오스 사슬 내부, 특히 상대적으로 접근성이 높은 무정형 영역을 절단하고, 셀로비오하이드롤라아제 또는 엑소글루카나아제는 노출된 사슬 말단에서 셀로비오스 단위의 방출에 관여하며, β -글루코시다아제는 셀로비오스와 짧은 올리고당을 포도당으로 더 분해합니다. 제지 공정에서는 이 전체 당화 경로가 끝까지 진행되는 것보다, 섬유 표면에서 제한적으로 일어나는 절단과 구조 완화가 더 중요합니다 [1].

종이는 셀룰로오스 섬유, 헤미셀룰로오스, 잔류 리그닌, 충전제, 전분계 첨가제, 코팅 성분, 잉크 입자, 접착성 오염물 등이 함께 얽힌 복합 재료입니다. 특히 회수지와 재생지 원료에서는 반복 건조·재습윤으로 인해 섬유가 경화되고, 잉크 및 코팅 잔사가 섬유 표면에 남아 탈묵과 배수를 어렵게 만들 수 있습니다. 셀룰라아제는 이러한 섬유 표면의 미세 구조를 조절해 잉크 분리, 물 빠짐, 리파이닝 반응성, 폐지 부산물의 효소적 분해 가능성을 바꾸는 생물학적 공정 보조제로 연구되어 왔습니다 [2].

이 효소를 “셀룰로오스를 녹이는 첨가제”로 이해하면 제지 응용을 오해하기 쉽습니다. 제지·펄프 현장의 목적은 대개 셀룰로오스를 당으로 최대한 전환하는 바이오연료 공정과 다릅니다. 종이 생산에서는 섬유 길이, 결합력, 벌크, 프리니스, 불투명도, 강도, 표면성 같은 물성이 유지되어야 하므로, 셀

를라아제의 역할은 과도한 분해가 아니라 조절된 표면 변형에 가깝습니다. 이러한 이유로 공정 적용에서는 원료 종류와 목적에 따라 탈묵용, 배수 개선용, 리파이닝 보조용, 폐지 슬러지 자원화용이라는 맥락을 구분해 해석하는 것이 중요합니다 [3].

셀룰라아제가 섬유 표면에서 작동하는 구체적 기전

셀룰로오스 섬유는 결정성 영역과 무정형 영역이 함께 존재하는 미세섬유 구조를 갖습니다. 결정성 영역은 사슬이 치밀하게 정렬되어 효소 접근성이 낮고, 무정형 영역과 섬유 표면의 손상 부위, 피브릴화된 부분, 미세분은 상대적으로 효소가 접근하기 쉽습니다. 셀룰라아제는 이 접근 가능한 부위에서 β -1,4 결합을 절단하여 섬유 표면의 거칠기, 피브릴 길이, 미세분의 부착성, 수분 보유 특성을 변화시킬 수 있습니다 [4].

엔도글루카나아제 중심의 작용은 제지 응용에서 특히 중요하게 다뤄집니다. 이 효소는 사슬 내부 절단을 통해 표면 피브릴을 짧게 만들거나 섬유 외층의 느슨한 셀룰로오스 네트워크를 부분적으로 완화할 수 있습니다. 그 결과 잉크 입자와 섬유 사이의 부착이 약해지거나, 물을 붙잡는 미세한 섬유 조각의 수화성이 낮아질 수 있습니다. 반면 엑소형 효소와 β -글루코시다아제의 상대적 기여가 커져 당화가 과도하게 진행되면, 섬유 수율과 강도에 불리한 방향으로 작용할 수 있어 제지 공정에서는 제한적 반응 제어가 핵심입니다 [1].

탈묵 공정에서 셀룰라아제의 기전은 “잉크를 직접 분해한다”기보다 “잉크가 붙어 있는 섬유 표면층을 약화한다”는 설명이 더 정확합니다. 폐지의 잉크는 안료, 수지, 오일, 바인더, 코팅 성분과 결합해 섬유 표면에 물리적·화학적으로 부착됩니다. 셀룰라아제가 표면 셀룰로오스의 일부 결합을 끊으면 잉크가 고정된 얇은 표층이 느슨해지고, 이후 세척이나 부상 단계에서 잉크 입자가 더 쉽게 분리될 수 있습니다. 다만 잉크 성분 자체가 복합적이므로 실제 탈묵에서는 셀룰라아제 외에 다른 효소나 화학 조건, 기계적 분산의 영향도 함께 작용합니다 [1].

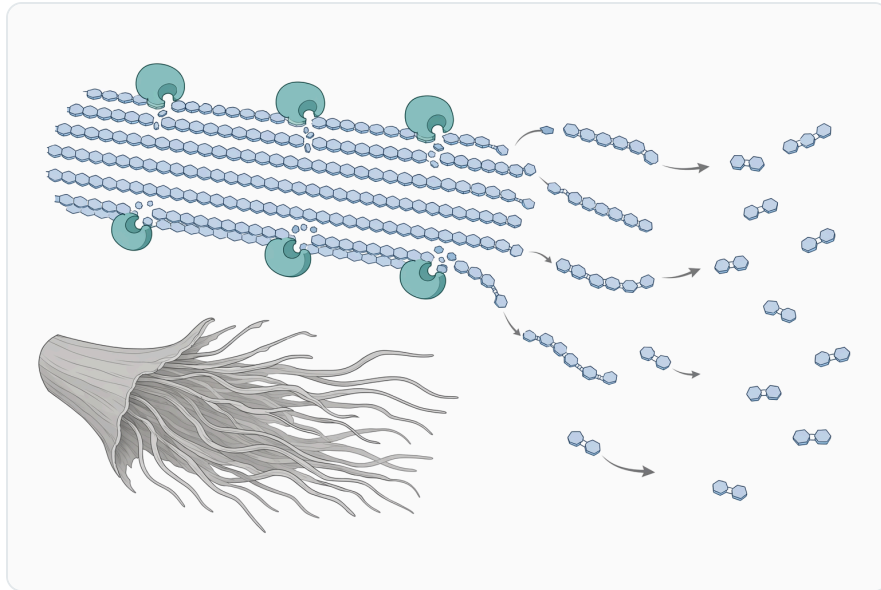


Figure 1. 셀룰라아제는 섬유벽 전체를 균일하게 분해하기보다 먼저 접근 가능한 셀룰로오스 표면, 피브릴, 미세분, 비정질 영역에 작용한다.

배수 개선에서는 섬유 매트 내부의 물 보유 구조가 중요합니다. 미세분과 과도한 표면 피브릴은 물을 강하게 붙잡고 여수 속도를 낮출 수 있습니다. 셀룰라아제 처리는 이런 미세 구조를 완화해 섬유 네트워크 내 물 이동을 쉽게 만들 수 있으며, 기계펄프 섬유 형태 연구에서도 효소 처리 조건이 섬유 형태와 표면 특성에 영향을 준다는 점이 평가되었습니다 [3]. 이 효과는 프레스와 건조 단계의 부담과 연결되지만, 반응이 지나치면 섬유 결합 면적이 줄어 강도 저하가 발생할 수 있습니다.

주요 응용 분야별 역할 비교

셀룰라아제는 제지·펄프 공정의 여러 지점에서 언급되지만, 각 응용의 목표와 위험 요인은 다릅니다. 아래 표는 산업적으로 자주 논의되는 적용 맥락을 목적, 작동 방식, 주의할 물성 기준으로 구분한 것입니다.

응용 분야	셀룰라아제의 주된 역할	기대되는 공정 효과	관리해야 할 한계
재생지 탈묵	섬유 표면층을 제한적으로 가수분해해 잉크 부착 약화	세척·부상 단계에서 잉크 분리 보조, 펄프 청정도 개선 가능	과반응 시 섬유 손상, 수율 저하, 강도 저하
배수·탈수 개선	피브릴과 미세분의 수분 보유 구조 완화	여수성 개선, 프레스·건조 부담 완화 가능	벌크, 결합력, 형성성 변화와 균형 필요
리파이닝 보조	섬유 외층을 부드럽게 만들어 기계적 처리 반응성 조절	리파이닝 조건 완화, 섬유 개질 효율 개선 가능	과도한 절단 시 인장강도와 섬유 길이 손실
펄프 표면 개질	셀룰로오스 외층의 접근성·거칠기 조절	종이 표면성, 결합성, 물성 조정 가능	원료별 결과 차이 큼

응용 분야	셀룰라아제의 주된 역할	기대되는 공정 효과	관리해야 할 한계
폐지 슬러지 자원화	셀룰로오스 성분을 당화 가능한 기질로 전환	포도당 풍부한 가수분해물 또는 바이오전환 원료 확보 가능	제지 생산 공정보다 바이오매스 전환 공정에 가까움

이 비교에서 보듯, 같은 셀룰라아제라도 “종이를 더 잘 만들기 위한 표면 개질”과 “폐기물을 당으로 바꾸는 가수분해”는 목표가 다릅니다. 전자는 섬유 물성을 보존해야 하고, 후자는 분해 효율과 당 회수가 더 중요합니다. 폐지 슬러지와 제지 부산물의 효소적 소화성 평가 연구들은 이러한 부산물이 셀룰로오스계 자원으로 전환될 가능성을 보여주지만, 이는 일반 제지 라인의 탈묵·배수 개선과는 다른 공정 논리로 해석해야 합니다 [5].

재생지 탈묵에서의 셀룰라아제

재생지 탈묵은 제지·펄프용 셀룰라아제가 가장 자주 연결되는 응용입니다. 회수지에는 인쇄 잉크, 코팅층, 접착제, 충전제, 전분계 성분이 남아 있으며, 반복 재활용으로 인해 섬유 표면이 비균일해집니다. 기존 탈묵은 알칼리 조건, 계면활성제, 과산화수소, 기계적 분산, 세척, 부상을 조합하는 경우가 많지만, 화학약품 사용과 폐수 부하가 함께 증가할 수 있습니다. 셀룰라아제는 이러한 공정에서 화학 처리를 전면 대체하기보다는, 잉크 탈착을 보조하는 생물학적 전처리로 검토되어 왔습니다 [1].

기전상 셀룰라아제는 잉크 입자와 섬유 사이의 계면을 느슨하게 만듭니다. 엔도글루카나아제 활성이 섬유 표면의 무정형 셀룰로오스를 절단하면, 잉크가 부착된 표층이 얇게 벗겨지거나 기계적 전단에 더 민감해질 수 있습니다. 이때 분리된 잉크 입자는 너무 작으면 세척수에 남거나 재부착될 수 있고, 너무 크면 부상 효율이 낮아질 수 있으므로, 효소 처리와 물리적 분산의 균형이 중요합니다. 따라서 탈묵 효소 처리는 단순히 “효소를 많이 넣으면 밝기가 오른다”는 식으로 해석할 수 없습니다.

셀룰라아제 단독보다 복합 효소 접근이 논의되는 이유도 여기에 있습니다. 폐지에는 셀룰로오스만 있는 것이 아니라, 헤미셀룰로오스, 전분, 지방성 잉크 성분, 접착성 오염물 등이 섞여 있습니다. 셀룰라아제는 섬유 표면층에 작용하지만, 자일라나아제는 헤미셀룰로오스 구조, 아밀라아제는 전분성 성분, 리파아제는 일부 지방성 오염물과 관련될 수 있습니다. 다만 본 문서의 초점은 셀룰라아제이며, 다른 효소의 역할은 원료 오염물 조성에 따라 달라지는 보조적 맥락으로 보는 것이 적절합니다 [6].

배수성 개선과 건조 부담 완화

제지 공정에서 물 제거는 생산성과 에너지 사용을 좌우합니다. 펄프 슬러리에서 물은 와이어, 프레스, 건조 단계를 거치며 제거되는데, 섬유 표면의 미세 피브릴과 미세분은 물을 강하게 보유해 여수성을 떨어뜨릴 수 있습니다. 셀룰라아제는 이런 표면 구조를 부분적으로 절단해 섬유 매트 내부의

물 이동 경로를 변화시킵니다. 기계펄프 섬유 형태에 대한 최근 연구는 셀룰라아제 가수분해 조건이 섬유 형태와 관련 특성에 영향을 줄 수 있음을 다루며, 공정 조건의 중요성을 보여줍니다 [3].

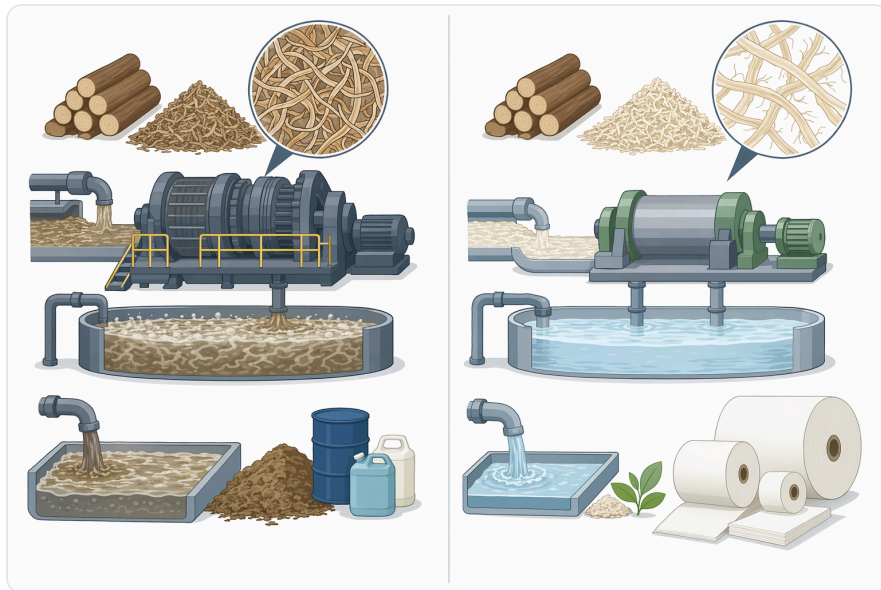


Figure 2. 제지 산업에서 셀룰라아제는 가벼운 섬유 표면 개질부터 당 방출을 위한 강도 높은 가수분해까지 다양하게 활용되며, 공정 목표와 위험 수준도 각각 다르다.

배수 개선은 건조 에너지와 연결되지만, 직접적인 에너지 절감 수치로 단순 환산하기는 어렵습니다. 원료 조성, 프리니스, 지합, 충전제 함량, 초지기 속도, 프레스 조건, 건조부 운전 조건이 함께 작용하기 때문입니다. 효소 처리로 물이 더 쉽게 빠질 수 있더라도, 섬유 간 결합이 약해지면 최종 종이 강도나 표면성이 손상될 수 있습니다. 따라서 배수 개선용 셀룰라아제는 물성 유지와 여수성 향상 사이의 균형을 맞추는 방향으로 이해해야 합니다.

특히 재생섬유는 반복 건조 과정에서 섬유벽이 붕괴되고 재팽윤성이 낮아지는 hornification 현상을 겪을 수 있습니다. 이러한 섬유는 신선한 화학펄프와 다르게 효소 접근성과 반응성이 달라질 수 있습니다. 셀룰라아제 처리가 표면을 부드럽게 하거나 미세분의 물 보유성을 낮출 가능성은 있지만, 원료가 이미 손상된 상태라면 과도한 절단은 더 빠르게 강도 손실로 이어질 수 있습니다. 이 때문에 재생지 배수 개선에서는 "효소 반응을 얼마나 진행할 것인가"가 핵심 제어 포인트가 됩니다 [2].

리파이닝 보조와 섬유 개질

리파이닝은 섬유를 기계적으로 처리해 피브릴화, 절단, 유연화, 결합성 개선을 유도하는 단계입니다. 그러나 리파이닝은 에너지를 많이 사용하며, 과도하면 섬유가 짧아지고 미세분이 늘어 배수성이 나빠질 수 있습니다. 셀룰라아제 전처리는 섬유 외층을 선택적으로 완화해 동일한 기계적 처리에서 다른 섬유 반응을 유도할 수 있습니다. 표백 침엽수 크라프트 펄프의 리파이닝 과정에서 셀룰라아제 효과를 평가한 연구도 이 응용 영역의 산업적 관심을 보여줍니다 [7].

리파이닝 보조용 셀룰라아제의 장점은 섬유 표면에 먼저 생화학적 변화를 주어 기계적 힘의 작용 방식을 바꿀 수 있다는 점입니다. 예를 들어 표면의 느슨한 셀룰로오스 사슬이 일부 절단되면 섬유 외층이 더 쉽게 열리거나, 반대로 지나친 피브릴화를 억제해 배수성을 유지하는 방향으로 작용할 수 있습니다. 하지만 이것은 원료와 조건에 크게 의존합니다. 침엽수 장섬유, 활엽수 단섬유, 기계펄프, 탈묵펄프는 섬유벽 구조와 잔류 성분이 달라 동일한 효소 처리에 대한 반응도 다르게 나타날 수 있습니다.

여기서 중요한 것은 셀룰라아제가 리파이닝을 “대체”한다기보다 “리파이닝 전후의 섬유 반응성을 조절”한다는 점입니다. 기계적 에너지, 섬유 결합, 배수, 강도는 서로 상충 관계를 가질 수 있으므로, 효소 처리는 특정 물성을 한쪽으로 밀어 올리는 만능 수단이 아닙니다. 기술적으로는 섬유 외층의 접근 가능한 부분을 제한적으로 개질해 공정 창을 넓히는 생물학적 보조 도구로 이해하는 것이 더 정확합니다 [7].

나노셀룰로오스와 고부가 섬유 소재 생산에서의 역할

셀룰라아제는 전통적인 종이 제조뿐 아니라 나노셀룰로오스 생산에서도 연구됩니다. 나노셀룰로오스는 셀룰로오스 섬유를 나노 규모로 분리한 소재로, 기계적 해섬만으로 제조하면 에너지 요구가 높아질 수 있습니다. 효소 전처리는 섬유의 무정형 영역이나 표면 피브릴을 부분적으로 절단해 이후 기계적 분산을 쉽게 만드는 방식으로 활용됩니다. 펄프·제지 산업 잔사와 효소 경로를 이용한 나노셀룰로오스 생산 가능성을 다룬 연구는 이러한 접근이 부산물 고부가화와 연결될 수 있음을 보여줍니다 [4].

나노셀룰로오스 영역에서는 셀룰라아제의 “분해력”과 “구조 보존” 사이의 균형이 특히 민감합니다. 너무 약한 처리는 기계적 해섬 부담을 충분히 줄이지 못하고, 너무 강한 처리는 섬유 길이와 결정성 구조를 손상시켜 원하는 나노섬유 특성을 해칠 수 있습니다. 일부 연구에서는 백색부후균 처리와 셀룰라아제 처리를 조합해 식물성 섬유로부터 나노결정 셀룰로오스를 얻는 친환경 바이오프로세싱 접근도 검토되었습니다 [8].

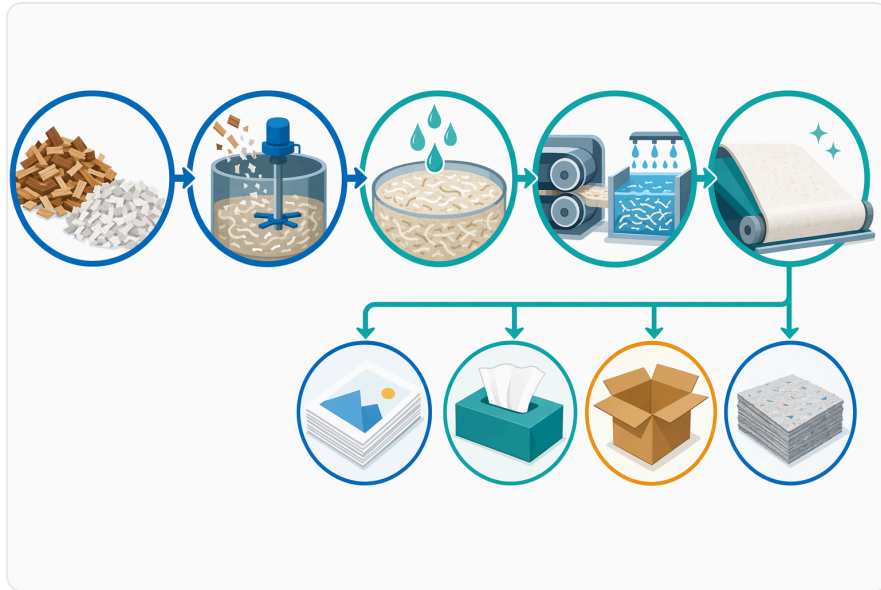


Figure 3. 재활용지 탈묵 공정에서 셀룰라아제는 셀룰로오스가 풍부한 잉크 부착 부위를 느슨하게 만든 뒤, 세척이나 부유선별을 통해 떨어져 나온 입자를 제거한다.

초음파 보조 bio-enzyme 열처리에서 펙티나아제와 셀룰라아제 비율, 전처리 시간이 나노셀룰로오스 제조에 미치는 영향을 다룬 연구도 있습니다. 이는 셀룰라아제가 단독으로 작용하는 경우뿐 아니라, 식물 세포벽의 펙틴·헤미셀룰로오스·셀룰로오스 구조를 함께 고려해야 하는 복합 전처리에서 중요한 역할을 할 수 있음을 시사합니다 [9]. 다만 이러한 고부가 소재 응용은 일반 초지 공정보다 정밀한 소재 제조에 가깝고, 목표 물성도 종이의 강도·배수성과 다릅니다.

폐지 슬러지와 제지 부산물의 효소적 자원화

제지 공정에서는 폐지 슬러지, 스크린 리젝트, 섬유성 부산물, 미세분이 포함된 유기성 폐기물이 발생합니다. 이들 부산물은 충전제와 무기물도 포함하지만, 조건에 따라 상당량의 셀룰로오스성 유기물을 포함할 수 있습니다. 셀룰라아제는 이러한 물질을 포도당이 풍부한 가수분해물로 전환하는 데 연구되어 왔으며, 이는 종이 생산 라인의 직접 품질 개선보다는 폐기물 자원화와 바이오전환의 영역에 해당합니다 [5].

탈리그닌화된 제지 산업 폐셀룰로오스 섬유를 셀룰라아제 복합체로 생물전환하는 연구는 제지 부산물이 효소적 기질이 될 수 있음을 보여주는 초기 근거 중 하나입니다 [10]. 또한 제지 산업 부산물의 효소적 소화성을 평가한 연구는 원료의 조성, 전처리, 효소 접근성에 따라 당화 가능성이 달라질 수 있음을 시사합니다 [2]. 이 맥락에서 셀룰라아제는 섬유 표면 개질제라기보다 셀룰로오스계 탄수화물을 발효 가능한 당으로 전환하는 촉매입니다.

폐지 슬러지의 효소 가수분해는 전처리와 밀접하게 연결됩니다. 리그닌, 회분, 잉크 잔사, 충전제, 금속 이온, 잔류 화학약품은 효소 접근성과 반응성을 제한할 수 있습니다. 리그노셀룰로오스 바이오매스 전처리 문헌은 산, 알칼리, 유기용매, 물리적 처리 등 다양한 방식이 셀룰로오스 접근성을 높이기 위해 사용될 수 있음을 설명합니다 [11]. 제지 부산물은 이미 일부 공정을 거친 소재라는 장점이 있지만, 슬러지 특성이 일정하지 않기 때문에 효소 반응 결과도 원료별 편차가 큼니다.

전처리와 공정 조건이 중요한 이유

셀룰라아제 반응은 효소 자체만으로 결정되지 않습니다. 셀룰로오스 접근성, 결정성, 리그닌·헤미셀룰로오스 잔류량, 섬유 표면적, 수분 상태, pH, 온도, 혼합, 체류 시간, 잔류 화학약품이 모두 영향을 미칩니다. 리그노셀룰로오스 바이오매스 전처리 연구들은 셀룰로오스 효소 가수분해 효율을 높이기 위해 구조를 열어 주는 전처리가 왜 중요한지 반복적으로 보여줍니다 [11].

활엽수에서 Fe³⁺와 아세트산의 상승효과를 이용해 자일로스 회수와 셀룰로오스 효소 효율을 높인 연구는, 금속 이온과 유기산 조건이 바이오매스 구조와 효소 접근성에 영향을 줄 수 있음을 보여줍니다 [12]. 유기용매 전처리와 효소 가수분해를 결합한 목재 폐기물 가치화 연구 역시 셀룰라아제가 충분히 작동하려면 기질 구조가 먼저 적절히 열려야 한다는 점을 강조하는 사례로 볼 수 있습니다 [13]. 제지 공정에서는 이러한 전처리 개념이 탈묵 전 분산, 펄프 농도 조절, 잔류 화학물질 관리, 기계적 전단과 결합되어 나타납니다.

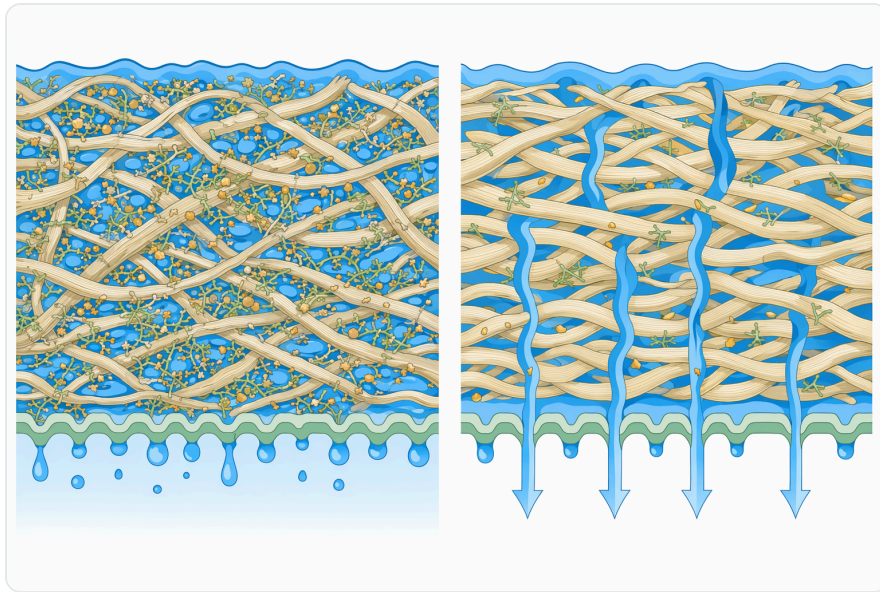


Figure 4. 셀룰라아제는 미세분, 피브릴, 섬유 팽윤, 기공 구조를 변화시켜 배수성과 보수성에 영향을 줄 수 있다.

효소는 단백질이므로 산화제, 강알칼리, 일부 계면활성제, 고온 장시간 노출에 의해 구조가 변성될 수 있습니다. 반대로 적절한 조건에서는 낮은 투입량으로도 표면 개질 효과를 낼 수 있습니다. 따라서 셀룰라아제를 공정에 이해할 때는 “효소가 어떤 기질을 만나는가”와 “그 기질이 어느 정도 열려

있는가”를 함께 봐야 합니다. 이 관점은 폐지 탈묵, 리파이닝 보조, 슬러지 당화 모두에 적용됩니다 [14].

미생물 유래 셀룰라아제와 효소 특성의 다양성

산업용 셀룰라아제는 곰팡이, 세균, 방선균 등 다양한 미생물에서 유래할 수 있습니다. 사상균은 셀룰라아제 생산 연구에서 오랫동안 중요한 플랫폼으로 다뤄져 왔으며, 효소 조합이 풍부하고 리그노셀룰로오스 분해에 필요한 여러 보조 활성을 함께 생성할 수 있다는 점이 특징입니다 [15]. 반면 일부 세균 유래 셀룰라아제는 특정 pH, 온도, 염 조건에서 안정성이 관심 대상이 되며, 공정 환경에 맞는 효소 후보로 연구됩니다.

고온성 *Bacillus licheniformis* 균주에서 산업적으로 관련 있는 셀룰라아제 생산을 평가한 연구는 내열성·공정 안정성에 대한 관심을 보여줍니다 [16]. *Aspergillus* 균주의 고체발효를 통한 셀룰라아제 생산과 적용 연구도 효소 생산 조건이 효소 특성과 활용성에 영향을 줄 수 있음을 보여줍니다 [17]. 다만 이러한 연구는 특정 균주와 특정 배양 조건의 결과이므로, 모든 산업용 셀룰라아제 제품에 동일하게 일반화해서는 안 됩니다.

제지·펄프 공정에서 중요한 것은 “어떤 미생물에서 왔는가”만이 아니라 “어떤 작용 프로파일을 갖는가”입니다. 탈묵에서는 과도한 섬유 절단을 피하면서 표면 잉크 탈착을 돕는 균형이 필요하고, 배수 개선에서는 미세 피브릴 조절과 강도 보존이 함께 중요합니다. 폐지 슬러지 당화에서는 더 깊은 가수분해와 당 생성이 목표가 될 수 있습니다. 따라서 셀룰라아제라는 이름 아래에도 응용 목적에 따라 바람직한 효소 조합과 반응 양상은 달라집니다 [1].

셀룰라아제 적용의 이점과 현실적 한계

셀룰라아제를 제지·펄프 공정에 도입하는 주요 이유는 생물학적 촉매가 비교적 온화한 조건에서 섬유 표면을 선택적으로 조절할 수 있기 때문입니다. 적절히 적용되면 탈묵 보조, 배수성 개선, 리파이닝 반응성 조절, 폐지 부산물의 당화 가능성 향상 같은 효과가 기대됩니다. 또한 제지 산업 폐수와 부산물의 환경 부담이 중요한 과제로 다뤄지는 상황에서, 효소 기반 처리는 화학약품 중심 공정의 일부 부담을 완화할 수 있는 보조 접근으로 평가됩니다 [18].

그러나 셀룰라아제는 만능 첨가제가 아닙니다. 같은 효소라도 펄프 종류, 회수지 조성, 잔류 잉크, 회분, pH, 온도, 체류 시간, 기계적 전단, 기존 첨가제에 따라 효과가 달라집니다. 특히 과도한 셀룰로오스 절단은 섬유 길이 감소, 미세분 증가, 강도 저하, 수율 손실로 이어질 수 있습니다. 이는 제지 공정에서 셀룰라아제 처리가 “강하게 많이”가 아니라 “목적에 맞게 제한적으로” 설계되어야 하는 이유입니다 [3].



Figure 5. 제지 및 펄프 분야에서 셀룰라아제는 탈묵, 백수 내 미세분 제어, 배수성 개선, 고해 보조, 바이오표백 보조, 나노셀룰로오스 생산, 슬러지 자원화 등에 활용된다.

환경적 관점에서조차 균형 잡힌 해석이 필요합니다. 효소 처리가 화학약품 사용이나 에너지 부담을 낮출 가능성은 있지만, 실제 환경 성과는 전체 공정의 물·에너지 흐름, 폐수 처리, 슬러지 처리, 제품 품질 손실 여부까지 포함해 평가해야 합니다. 제지·카드보드 제조 폐수의 생물학적 처리 지속가능성을 다룬 연구들은 제지 산업의 환경 성과가 단일 첨가제보다 공정 전체의 통합 관리와 밀접하다는 점을 보여줍니다 [18].

Enzymes.bio에서 구매 가능한 제지·펄프용 셀룰라아제 이해

Enzymes.bio는 효소를 온라인으로 공급하는 업체이며, 제조사나 자체 실험실로 표시되어서는 안 됩니다. 제지·펄프용 셀룰라아제는 셀룰로오스 섬유 표면 개질, 재생지 탈묵 보조, 배수성 개선, 리파이닝 보조, 제지 부산물의 바이오전환 가능성 검토에 적합한 산업용 효소 카테고리 이해할 수 있습니다.

제품은 1kg 단위로 온라인에서 직접 구매할 수 있으며, 샘플·견적·도매·대량 주문 유도 없이 표준 온라인 주문 방식으로 제공됩니다. 주문 시 CoA와 SDS가 함께 제공되므로, 구매자는 제품 수령 시 관련 문서를 확인할 수 있습니다. 본 문서는 제품의 산업적 의미와 과학적 배경을 설명하는 기술 자료이며, 특정 공정 성능을 보증하거나 제조사 실험 결과를 대체하는 문서가 아닙니다.

제지·펄프용 셀룰라아제를 검토할 때 가장 중요한 이해 포인트는 세 가지입니다. 첫째, 셀룰라아제의 핵심 작용은 셀룰로오스 섬유 표면의 제한적 가수분해입니다. 둘째, 탈묵·배수·리파이닝·슬러지 자원화는 서로 다른 목표를 가진 응용이므로 동일한 방식으로 해석하면 안 됩니다. 셋째, 효소 효과

는 공정 조건과 원료 구조에 크게 의존하므로, 문헌의 결과는 특정 조건에서의 과학적 근거로 이해해야 하며 모든 설비에 동일하게 적용되는 절대값으로 볼 수 없습니다 [1].

핵심 요약

제지·펄프 산업용 셀룰라아제는 종이 섬유를 무차별적으로 분해하는 효소가 아니라, 셀룰로오스 섬유 표면의 접근 가능한 영역을 제한적으로 절단해 공정 반응성을 바꾸는 생물학적 촉매입니다. 재생지 탈묵에서는 잉크가 부착된 표면층을 느슨하게 하고, 배수 개선에서는 피브릴과 미세분의 물 보유 구조를 조절하며, 리파이닝 보조에서는 기계적 처리에 대한 섬유 반응을 바꾸는 방식으로 작동합니다. 폐지 슬러지와 제지 부산물에서는 더 깊은 효소 가수분해를 통해 포도당이 풍부한 가수분해물 생산이나 바이오전환 원료 확보에 활용될 수 있습니다 [5].

연구 문헌은 셀룰라아제가 탈묵, 섬유 형태 변화, 리파이닝 보조, 나노셀룰로오스 제조, 제지 부산물 자원화와 연결될 수 있음을 보여줍니다. 동시에 셀룰라아제의 효과는 원료, 전처리, pH, 온도, 체류 시간, 기계적 처리, 기존 화학약품의 영향을 크게 받습니다. 따라서 가장 정확한 기술적 표현은 “제지·펄프 공정에서 셀룰로오스 섬유의 제한적 표면 개질을 통해 탈묵, 배수, 리파이닝 및 부산물 전환을 보조할 수 있는 효소”입니다.

Cellulase Enzyme For Paper And Pulp Industry 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.

[Cellulase Enzyme For Paper And Pulp Industry 구매하기 →](#)

참고문헌

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

1. Singh, S., Singh, V., Aamir, M., Dubey, M., Patel, J., Upadhyay, R., & Gupta, V. (2016). Cellulase in Pulp and Paper Industry.
2. Silva, P. R., Magalhães, W., Helm, C., Lima, E., Mendes, D., & Lima, T. (2011). Evaluation of the enzymatic digestibility of paper industry byproducts. *BMC Proceedings*, 5, P117 - P117.
3. Frias, M., Reynoso, S., Rambhia, S., Noki, G., Olson, J., Stoeber, B., & Trajano, H. L. (2024). Effect of incubation conditions of cellulase hydrolysis on mechanical pulp fibre morphology. *Carbohydrate Polymers*, 344, 122529 .

4. Michelin, M., Gomes, D. G., Romani, A., Polizeli, M., & Teixeira, J. (2020). Nanocellulose Production: Exploring the Enzymatic Route and Residues of Pulp and Paper Industry. *Molecules*, 25.
5. Naicker, J., Govinden, R., Lekha, P., & Sithole, B. (2020). Transformation of pulp and paper mill sludge (PPMS) into a glucose-rich hydrolysate using green chemistry: Assessing pretreatment methods for enhanced hydrolysis. *Journal of Environmental Management*, 270, 110914 .
6. Mafei, T. D. T., Neto, F. S. P. P., Peixoto, G., Neto, Á. B., Monti, R., & Masarin, F. (2019). Extraction and Characterization of Hemicellulose from Eucalyptus By-product: Assessment of Enzymatic Hydrolysis to Produce Xylooligosaccharides. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 190, 197-217.
7. Park, S. G., Tak, J., Lee, J. Y., Shin, K. S., & Park, S. I. (2024). Evaluation of cellulase effect on the refining process of softwood bleached kraft pulp. *BioResources*.
8. Akli, K., Maryam, M., Senjawati, M. I., & Ilyas, R. A. (2022). Eco-Friendly Bioprocessing Oil Palm Empty Fruit Bunch (Opefb) Fibers Into Nanocrystalline Cellulose (Ncc) Using White-Rot Fungi (Tremetes Versicolor) and Cellulase Enzyme (Trichoderma Reesei). *Journal of Fibers and Polymer Composites*.
9. Wu, X., Yuan, X., Zhao, J., Ji, D., Guo, H., Yao, W., Li, X., ... et al. (2023). Study on the effects of different pectinase/cellulase ratios and pretreatment times on the preparation of nanocellulose by ultrasound-assisted bio-enzyme heat treatment. *RSC Advances*, 13, 5149 - 5157.
10. Nikolov, T., Bakalova, N. G., Petrova, S., Benadova, R., Spasov, S., & Kolev, D. (2000). An effective method for bioconversion of delignified waste-cellulose fibers from the paper industry with a cellulase complex. *Bioresource Technology*, 71, 1-4.
11. Hoa, D. T., Man, T., & Hau, N. V. (2017). PRETREATMENT OF LIGNOCELLULOSIC BIOMASS FOR ENZYMATIC HYDROLYSIS. *Asean Journal on Science and Technology for Development*, 25, 341-346.
12. Huang, K., Das, L., Guo, J., & Xu, Y. (2019). Catalytic valorization of hardwood for enhanced xylose-hydrolysate recovery and cellulose enzymatic efficiency via synergistic effect of Fe³⁺ and acetic acid. *Biotechnology for Biofuels*, 12.
13. Pazzaglia, A., Fabbrizi, G., Gelosia, M., Galmacci, T., Giannoni, T., Iapino, A., Nicolini, A., ... et al. (2025). Wood Waste Valorization Using Organosolv Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis: Experimental and Process Evaluation. *Recycling*.
14. Sulman, A., Matveeva, V., & Bronstein, L. (2022). Cellulase Immobilization on Nanostructured Supports for Biomass Waste Processing. *Nanomaterials*, 12.
15. Zhang, Z., Xing, J., Li, X., Lu, X., Liu, G., Qu, Y., & Zhao, J. (2024). Review of research progress on the production of cellulase from filamentous fungi. *International Journal of Biological Macromolecules*, 134539 .
16. Kiran, T., Asad, W., Ajaz, M., Hanif, M., & Rasool, S. A. (2018). Industrially relevant cellulase production by indigenous thermophilic Bacillus licheniformis TLW-3 strain: Isolation-molecular identification and enzyme yield optimization. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*, 31 6, 2333-2340 .
17. Boondaeng, A., Keabpimai, J., Trakunjae, C., Vaithanomsat, P., Srichola, P., & Niyomvong, N. (2024). Cellulase production under solid-state fermentation by Aspergillus sp. IN5: Parameter optimization and application. *Heliyon*, 10.

18. Tawfik, A., Bakr, M. H., Nasr, M., Haider, J., Mesfer, M. K., Lim, H., Qyyum, M., ... et al. (2021). Economic and environmental sustainability for anaerobic biological treatment of wastewater from paper and cardboard manufacturing industry. *Chemosphere*, 133166 .


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