

산업용 에탄올 생산용 내열성 알파-아밀라아제: 전분 액화와 발효 기질 준비 효소

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

내열성 알파-아밀라아제는 옥수수, 밀, 카사바, 쌀 등 전분질 원료를 사용하는 산업용 에탄올 공정에서 고온 액화 단계의 핵심 효소로 쓰입니다. 이 효소는 전분의 내부 α -1,4 글리코시드 결합을 절단해 긴 전분 사슬을 덱스트린과 올리고당 수준으로 낮추며, 그 결과 매시 점도를 줄이고 후속 당화·효모 발효가 진행될 수 있는 기질 상태를 만듭니다 ^[1].

Enzymes.bio의 **Thermostable Alpha Amylase Enzyme For Industrial Ethanol Production**은 1kg 단위로 온라인 직접 구매할 수 있는 산업용 효소 제품입니다. Enzymes.bio는 제조사나 실험실이 아닌 공급업체이며, 제품 주문 시 CoA와 SDS가 함께 제공됩니다.

내열성 알파-아밀라아제가 에탄올 공정에서 맡는 정확한 역할

전분 기반 에탄올 생산에서 알파-아밀라아제의 역할은 “에탄올을 직접 만드는 것”이 아니라 “효모가 사용할 수 있는 당으로 전환되기 전 단계의 전분을 처리 가능한 형태로 바꾸는 것”입니다. 전분은 포도당 단위가 α -1,4 및 α -1,6 결합으로 연결된 고분자이며, 효모는 이 고분자를 그대로 빠르게 발효하지 못합니다. 따라서 전분질 원료는 분쇄·슬러리화·가열을 거쳐 젤라틴화되고, 알파-아밀라아제에 의해 내부 결합이 절단되어 덱스트린화된 뒤, 글루코아밀라아제 등 후속 효소에 의해 발효성 당으로 더 분해됩니다 ^[2].

이때 “내열성”이라는 특성은 산업 운전에서 중요합니다. 전분 슬러리는 가열되면 팽윤하고 점도가 증가하며, 액화 단계는 비교적 높은 온도와 밀접하게 연결됩니다. 일반적인 단백질 효소는 열에 의해 구조가 쉽게 풀릴 수 있지만, 내열성 알파-아밀라아제는 고온 액화 조건에서 효소 기능을 유지하도록 선택되거나 개발된 효소군입니다. 오래전부터 세균성 내열성 알파-아밀라아제는 전분 가수분해와 효소 생산 경제성 측면에서 연구되어 왔으며, 이는 고온 전분 처리 공정에서 이 효소군이 산업적으로 중요하다는 점을 보여줍니다 ^[1].

산업용 에탄올 생산에서는 원료, 고형분 농도, 가열 방식, pH, 체류 시간, 교반 조건, 당화 효소 조합, 효모 균주가 모두 결과에 영향을 줍니다. 따라서 내열성 알파-아밀라아제는 에탄올 수율을 단독으로 보장하는 첨가제가 아니라, 전분 액화라는 특정 병목을 완화해 전체 공정이 발효 단계로 넘어갈 수 있게 돕는 전처리·액화 효소로 이해하는 것이 정확합니다 ^[3].

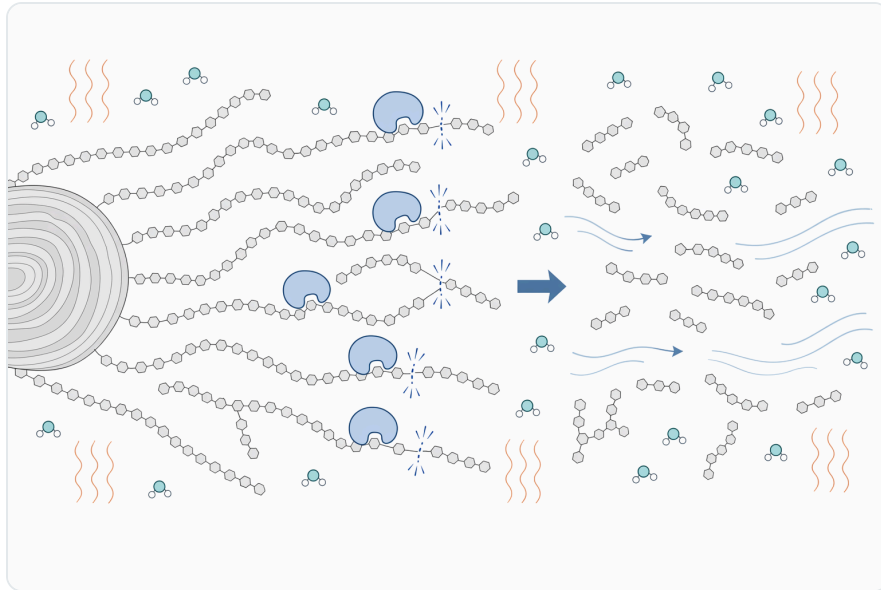


Figure 1. 내열성 알파아밀레이스는 아밀로스과 아밀로펙틴 내부의 α -1,4 글리코시드 결합을 절단해 덱스트린과 말토올리고당을 형성함으로써 전분을 액화한다.

전분 액화에서 생기는 공정 문제: 점도, 열전달, 효소 접근성

전분질 원료가 물과 섞이고 가열되면 전분 과립이 물을 흡수해 팽윤하며, 아밀로스과 아밀로펙틴 구조가 풀리면서 매시의 점도가 급격히 높아질 수 있습니다. 점도가 높아지면 교반이 불균일해지고, 열전달이 느려지며, 펌핑과 이송에 더 많은 에너지가 들어갑니다. 액화 단계에서 알파-아밀라아제가 내부 결합을 빠르게 절단하면 고분자 전분의 평균 사슬 길이가 줄어들고, 매시가 더 흐르기 쉬운 상태가 됩니다 [1].

이 변화는 단순한 물성 개선에 그치지 않습니다. 전분 사슬이 짧아지면 후속 당화 효소가 접근할 수 있는 비환원 말단과 짧은 기질 조각이 증가합니다. 글루코아밀라아제, 풀룰라나아제, 아밀로글루코시다아제 등 후속 효소가 작용하기 전, 알파-아밀라아제가 긴 사슬을 끊어 주어야 당화 단계가 더 균일하게 진행될 수 있습니다. 쌀을 원료로 한 효소 공정에서 트레할로스, 바이오에탄올, 고단백 산물을 동시에 생산한 연구도 전분질 원료의 효소적 분해가 에탄올 생산과 공동생산물 형성의 기반이 될 수 있음을 보여줍니다 [2].

고온 액화에서 효소 안정성이 부족하면 공정상 두 가지 문제가 생깁니다. 첫째, 전분이 충분히 절단되기 전에 효소가 변성되어 점도 저감이 지연될 수 있습니다. 둘째, 후속 당화 단계에 넘어가는 덱스트린 조성이 불균일해져 발효 전 당 생성이 흔들릴 수 있습니다. 내열성 알파-아밀라아제는 이러한 고온 구간에서 액화 반응을 유지하도록 설계된 효소 카테고리이므로, 전분 기반 에탄올 공정의 초기 안정화에 특히 적합합니다 [4].

작용 기전: α -1,4 결합을 내부에서 절단하는 엔도형 전분분해

알파-아밀라아제는 전분 사슬의 말단부터 하나씩 떼어내는 효소가 아니라, 사슬 내부의 α -1,4 글리코시드 결합을 절단하는 엔도형 효소입니다. 아밀로스는 주로 선형 α -1,4 결합으로 이루어져 있고, 아밀로펙틴은 α -1,4 주쇄와 α -1,6 가지 결합을 함께 갖습니다. 알파-아밀라아제가 내부 α -1,4 결합을 절단하면 긴 고분자가 여러 개의 짧은 덱스트린으로 나뉘며, 이 과정이 액화의 핵심입니다 [1].

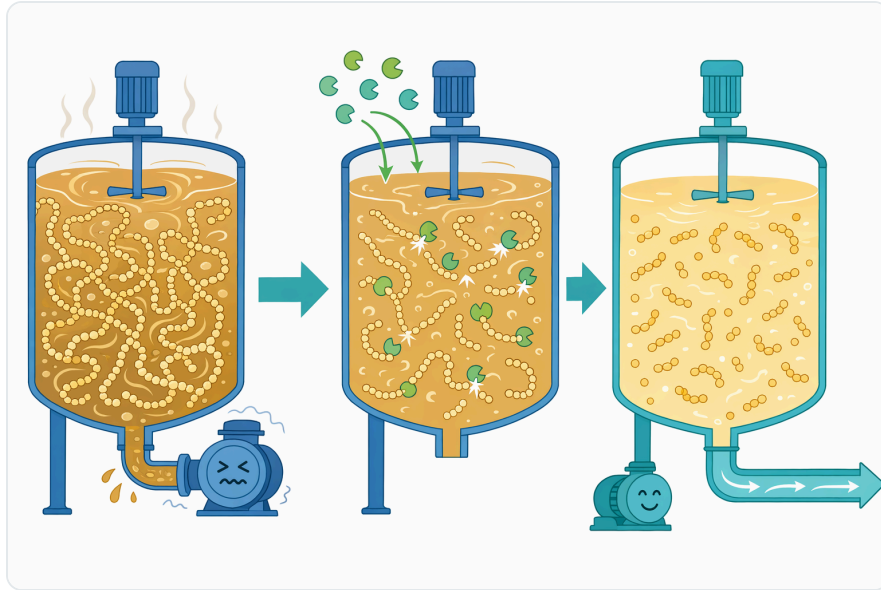


Figure 2. 수화된 긴 전분 사슬을 더 짧은 조각으로 절단하면 매시의 점도가 낮아지고 공정성이 향상된다.

이 기전을 공정 관점에서 보면, 알파-아밀라아제는 전분을 즉시 포도당으로 완전히 바꾸는 효소가 아닙니다. 액화의 1차 목적은 “완전 당화”가 아니라 “긴 전분 사슬을 잘라 점도를 낮추고, 후속 효소가 처리하기 쉬운 덱스트린 풀을 만드는 것”입니다. 이 때문에 산업용 에탄올 공정에서는 알파-아밀라아제와 글루코아밀라아제 또는 기타 당화 효소가 단계적으로 또는 통합적으로 사용되는 경우가 많습니다 [2].

가지 구조가 많은 아밀로펙틴에서는 α -1,6 결합이 남아 한계 덱스트린이 형성될 수 있습니다. 이 지점에서 풀룰라나아제나 아밀로풀룰라나아제 같은 탈분지 효소가 추가적으로 의미를 가질 수 있습니다. 실제로 세균성 아밀로풀룰라나아제를 이소성 발현한 옥수수 곡물 연구에서는 전분 분해 관련 효소 기능이 옥수수 기반 바이오에탄올 생산성과 연결될 수 있음을 보고했습니다 [5].

왜 “내열성”이 산업용 에탄올에서 중요한가

전분 액화는 열과 효소 반응이 동시에 맞물리는 단계입니다. 전분 과립을 물리적으로 열어 효소 접근성을 높이려면 가열이 필요하지만, 효소는 단백질이기 때문에 열에 의해 3차 구조가 손상될 수 있습니다. 내열성 알파-아밀라아제는 이 상충 조건을 완화합니다. 즉, 전분 젤라틴화와 효소 액화를 더

가까운 공정 구간에서 연결할 수 있게 해 줍니다 [1].

고온에서 작동 가능한 효소는 점도 저감뿐 아니라 위생적 안정성과 공정 단순화에도 간접적으로 기여할 수 있습니다. 온도가 높은 구간은 일부 오염 미생물의 증식을 억제하는 데 유리할 수 있으며, 액화가 빠르게 진행되면 슬러리 취급 시간이 짧아질 수 있습니다. 다만 이는 모든 현장에서 자동으로 동일하게 나타나는 효과가 아니며, 실제 결과는 원료와 운전 조건에 따라 달라집니다 [6].

내열성 알파-아밀라아제는 다양한 미생물에서 탐색되어 왔습니다. Bacillus 계열 미생물은 알파-아밀라아제 생산 연구에서 자주 다루어져 왔고, 토양에서 분리한 Bacillus sp.의 알파-아밀라아제 생산 및 특성화 연구도 보고되어 있습니다 [7]. 또한 Talaromyces pinophilus 유래 칼슘 비의존성 α -아밀라아제처럼 곰팡이 유래 효소도 효율과 안정성 측면에서 연구되어, 미생물 자원이 전분분해효소 개발의 중요한 기반임을 보여줍니다 [4].

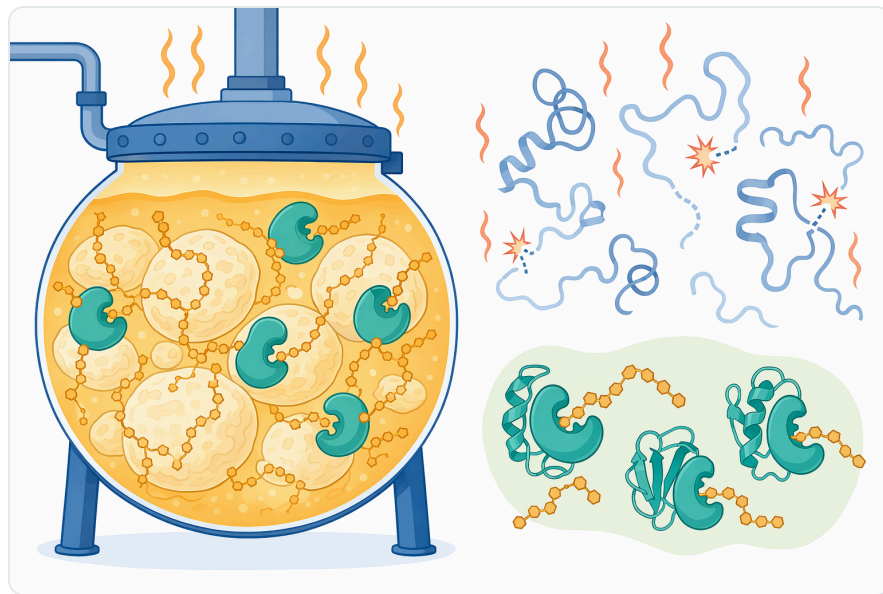


Figure 3. 내열성 덕분에 알파아밀레이스는 호화된 전분에 가장 쉽게 접근할 수 있는 고온 전분 액화 과정에서도 촉매 구조를 유지할 수 있다.

전분 기반 에탄올 공정에서의 위치

내열성 알파-아밀라아제는 보통 원료 준비 이후, 당화와 발효 이전의 액화 구간에 위치합니다. 곡물이나 전분질 원료는 분쇄되어 물과 혼합되고, 가열되면서 전분 구조가 열립니다. 이때 알파-아밀라아제가 투입되어 고분자 전분을 짧은 덱스트린으로 분해합니다. 이후 당화 효소가 덱스트린을 포도당 등 발효성 당으로 전환하고, 효모가 이를 에탄올과 이산화탄소로 발효합니다 [3].

현대 에탄올 생산은 전분질 원료만 다루지 않고, 식품 폐기물, 대추 부산물, 리그노셀룰로오스 바이오매스 등 다양한 탄수화물 자원을 검토합니다. 대추 폐기물을 활용한 에탄올 생산 기술과 잠재성을 다룬 연구는 원료 다양화가 바이오에탄올 분야의 중요한 흐름임을 보여줍니다 [3]. 그러나 전분질 원

료를 사용하는 경우에는 여전히 전분 액화가 핵심 병목이며, 이 지점에서 내열성 알파-아밀라아제의 역할이 가장 명확합니다.

2세대 리그노셀룰로오스 에탄올 공정에서는 셀룰라아제, 헤미셀룰라아제, 리그닌 관련 효소, 당 수송체, 억제물질 내성 효모 등 다른 요소가 더 큰 비중을 가집니다. 산업용 2세대 효모 균주가 여러 리그노셀룰로오스 분해 효소를 동시에 분비해 다양한 고분자 기질에서 에탄올 생산을 가능하게 한 연구는 효소 통합이 바이오에탄올의 주요 기술 방향임을 보여줍니다 [8]. 이에 비해 내열성 알파-아밀라아제는 전분 기반 원료에서 가장 직접적인 가치를 갖는 효소입니다.

주요 공정 요소별 비교

공정 요소	주된 기능	내열성 알파-아밀라아제와의 관계	에탄올 생산에서의 의미
전분질 원료	옥수수, 밀, 카사바, 쌀 등 탄수화물 공급원	효소가 작용할 기질 제공	원료의 전분 함량과 구조가 액화 난이도에 영향
가열-젤라틴화	전분 과립을 팽윤·개방	효소 접근성 증가, 동시에 열 안정성 요구	액화 반응을 시작할 수 있는 물리적 조건 형성
내열성 알파-아밀라아제	내부 α-1,4 결합 절단	고온 액화 구간에서 덱스트린화 수행	점도 저감, 후속 당화 준비
글루코아밀라아제 등 당화 효소	덱스트린을 발효성 당으로 전환	알파-아밀라아제가 만든 짧은 기질을 추가 분해	효모가 사용할 당 생성
효모	당을 에탄올로 발효	알파-아밀라아제가 직접 담당하지 않는 단계	에탄올 생성의 직접 주체
증류·탈수	에탄올 회수 및 농축	효소 반응 이후의 분리 단계	최종 제품 회수와 에너지 소비에 영향

이 표에서 중요한 점은 내열성 알파-아밀라아제가 에탄올 공정 전체를 대체하는 효소가 아니라는 것입니다. 그 역할은 전분질 원료가 발효 가능한 당으로 전환되기 전, 물성과 분자량을 낮춰 다음 단계가 진행되게 만드는 데 집중됩니다. 리그노셀룰로오스 기반 공정에서 당 수송체와 효모 대사가 중요한 병목으로 연구되는 것처럼, 전분 기반 공정에서는 액화와 당화의 균형이 발효 안정성에 영향을 줍니다 [9].

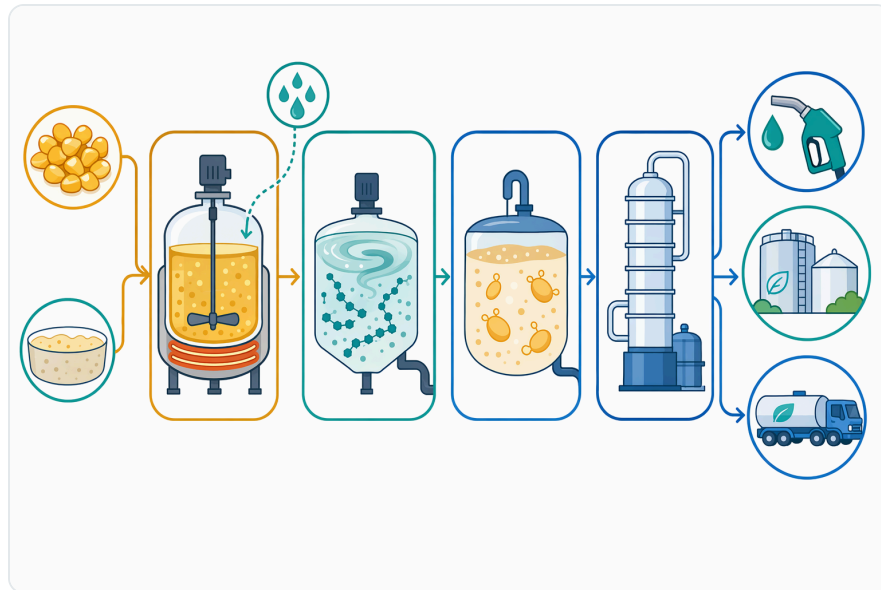


Figure 4. 전분 에탄올 생산은 조리, 알파아밀레이스 액화, 당화, 발효, 에탄올 회수를 각각 별도의 공정 단계로 구분한다.

옥수수, 쌀, 카사바 등 전분질 원료별 고려점

옥수수 기반 에탄올에서는 전분 함량이 높고 공정 경험이 축적되어 있어, 알파-아밀라아제 액화와 후속 당화 효소 조합이 비교적 명확한 역할 분담을 가집니다. 옥수수 곡물에서 세균성 아밀로풀룰라나아제 발현이 바이오에탄올 생산 향상과 연결된 연구는, 옥수수 전분의 효소적 가수분해 개선이 발효 효율과 직접 관련될 수 있음을 보여줍니다 [5].

쌀 기반 원료에서는 전분 전환뿐 아니라 공동생산물 설계가 함께 고려될 수 있습니다. 쌀을 효소 공정으로 처리해 트레할로스, 바이오에탄올, 고단백 제품을 동시에 생산한 연구는 전분질 원료가 단일 연료 생산을 넘어 다중 산물 바이오프로세스로 활용될 수 있음을 제시합니다 [2]. 이때 알파-아밀라아제는 전분을 초기 분해하는 축에 놓이며, 공정 목적에 따라 당화 정도와 발효 단계가 다르게 설계될 수 있습니다.

카사바, 감자, 고구마와 같은 뿌리 작물 또는 전분질 부산물은 원료 수급과 지역성이 강합니다. 이러한 원료는 전분 외 섬유질, 펙틴, 단백질, 미네랄 조성이 다를 수 있어 슬러리 점도와 효소 접근성이 옥수수과 다르게 나타날 수 있습니다. 유기성 폐기물의 생물전환과 재생에너지 관점에서 미생물 효소의 역할을 검토한 연구는 다양한 폐기성 탄수화물 자원이 효소 기반 전환의 대상이 될 수 있음을 설명합니다 [10].

내열성 효소와 효소 생산 기술의 산업적 배경

산업용 효소는 단순히 특정 반응을 촉매하는 단백질이 아니라, 대량 공정에서 안정성, 생산성, 비용, 저장성, 취급성을 함께 만족해야 하는 생물공정 제품입니다. 곰팡이 세포공장을 이용한 산업 효소 개발에서는 단백질 분비, 균주 안정성, 발효 공정, 후처리 등 여러 과제가 함께 다뤄집니다 [11]. 이는 내열성 알파-아밀라아제와 같은 산업용 효소가 미생물 생명공학, 단백질 공학, 공정 최적화의 누적 결과물이라는 점을 보여줍니다.



Figure 5. 내열성 알파아밀레이스는 옥수수, 카사바, 수수, 쌀, 사과, 타피오카 잔여물, 식품 폐기물 등 전분이 풍부한 에탄올 원료와 관련이 있다.

Pichia pastoris 같은 효모 시스템은 산업 효소와 재조합 단백질 생산을 위한 세포공장으로 널리 연구되어 왔습니다. 바이오리액터 기반 *Pichia pastoris* 산업 효소 생산에 관한 리뷰는 재조합 단백질 생산에서 발현 시스템, 배양 조건, 스케일업이 핵심 요소임을 정리합니다 [12]. 다만 Enzymes.bio는 이러한 제조 공정을 수행하는 제조사가 아니며, 본 제품 설명은 특정 생산 균주나 제조법을 주장하기 위한 문서가 아닙니다.

Aspergillus oryzae 역시 산업 생산에서 중요한 세포공장으로 연구되어 왔습니다. 이 균주는 전통 발효식품뿐 아니라 효소 및 단백질 생산 분야에서 응용 가능성이 다뤄져 왔고, 산업적 안전성과 분비 능력 때문에 관심을 받습니다 [13]. 알파-아밀라아제가 미생물 유래 효소균으로 폭넓게 개발되어 온 배경을 이해하면, 내열성 알파-아밀라아제가 왜 전분 가공과 바이오에탄올 분야에서 반복적으로 선택되는지 설명할 수 있습니다.

전분 액화가 물·에너지 관리와 연결되는 이유

에탄올 생산에서 효소는 생화학적 전환만 담당하는 것처럼 보이지만, 실제로는 물과 에너지 흐름에도 영향을 줄 수 있습니다. 전분 슬러리의 점도가 높으면 펌핑과 교반에 더 많은 에너지가 필요하고, 열전달이 불균일하면 가열·냉각 관리가 어려워질 수 있습니다. 산업용 에탄올 생산의 물 발자국과 물 핀치 분석 연구는 물 관리가 에탄올 산업 공정의 중요한 최적화 영역임을 보여줍니다 [6].

알파-아밀라아제에 의한 액화가 충분히 진행되면 매시의 흐름성이 개선되어 이송과 혼합이 더 안정될 수 있습니다. 이는 직접적인 에너지 절감 수치를 보장한다는 의미가 아니라, 고점도 슬러리 취급에서 발생하는 기계적 부담을 줄일 수 있는 공정적 근거가 있다는 뜻입니다. 특히 고형분 농도를 높여 생산성을 개선하려는 공정에서는 점도 관리가 더 민감해지며, 내열성 알파-아밀라아제의 액화 역할이 더 중요해질 수 있습니다 [1].

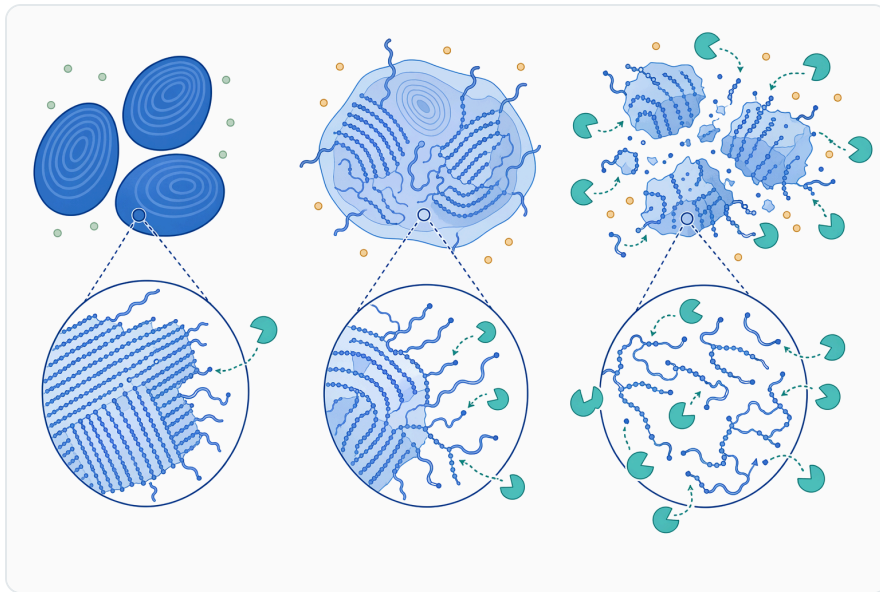


Figure 6. 전분 과립 구조, 소화, 물리적 파쇄는 알파아밀레이스가 전분의 α -1,4 결합에 얼마나 쉽게 접근할 수 있는지에 영향을 준다.

에탄올 생산의 지속가능성은 원료 선택, 물 사용, 효소 비용, 발효 효율, 증류 에너지, 부산물 활용이 함께 결정합니다. 대추 폐기물처럼 식품·농업 부산물을 에탄올 원료로 검토하는 연구는 폐기물 전환과 재생연료 생산이 연결될 수 있음을 보여주며, 전분질 또는 당질 원료의 효소적 전환은 이러한 흐름의 한 축입니다 [3].

후속 당화·발효와의 연결: 효소 반응과 효모 대사의 경계

내열성 알파-아밀라아제는 액화 단계에서 전분을 짧게 자르지만, 효모가 주로 이용하는 포도당이나 일부 단당·이당을 충분히 만들려면 후속 당화가 필요합니다. 따라서 알파-아밀라아제의 성능은 당화 효소의 작용성과 연결되어 평가되어야 합니다. 덱스트린 구성이 너무 길거나 가지 구조가 많이 남아

있으면 당화 속도가 낮아질 수 있고, 반대로 액화가 균일하면 발효 전 당 조성이 더 예측 가능해집니다 [12].

효모 발효 단계에서는 당 수송과 대사가 핵심입니다. 산업용 곰팡이의 당 수송체를 다룬 연구는 2세대 에탄올 생산에서 다양한 당을 세포 내로 들여보내는 능력이 중요하다고 설명합니다 [9]. 전분 기반 공정에서도 최종적으로 생성된 당이 효모에 의해 얼마나 빠르고 안정적으로 발효되는지가 중요하며, 알파-아밀라아제는 그 전 단계에서 당 생성의 출발 물질을 준비합니다.

일부 연구는 전분 기반 산업 효모가 리그노셀룰로오스 에탄올 조건에서도 응용될 수 있음을 검토했습니다. PEG 해독 조건에서 전분 기반 산업 효모를 이용한 리그노셀룰로오스 에탄올 생산 연구는 효모의 내성, 원료 전처리, 억제물질 관리가 발효 결과를 좌우할 수 있음을 보여줍니다 [14]. 이는 알파-아밀라아제가 중요하더라도, 최종 에탄올 생산성은 효소 액화 이후의 생물학적 발효 조건까지 포함해 해석해야 한다는 점을 뒷받침합니다.

제품 사용 해석에서 피해야 할 오해

첫 번째 오해는 “내열성 알파-아밀라아제가 에탄올을 직접 만든다”는 것입니다. 에탄올은 효모 또는 다른 발효 미생물이 당을 대사해 생성하는 산물입니다. 알파-아밀라아제는 전분을 덱스트린으로 낮추는 액화 효소이며, 에탄올 생성 자체의 촉매는 아닙니다 [3].



Figure 7. 전분 기반 에탄올은 아밀라아제에 의한 액화와 당화에 의존하는 반면, 리그노셀룰로오스 에탄올은 전처리와 셀룰라아제 또는 헤미셀룰라아제 시스템이 필요하다.

두 번째 오해는 “내열성이라면 모든 고온 조건에서 무제한 안정하다”는 것입니다. 내열성은 상대적인 공정 적합성을 의미하며, 단백질 효소는 여전히 pH, 장시간 열 노출, 금속 이온, 원료 불순물, 고형분 농도, 전단 조건 등에 영향을 받습니다. 칼슘 비의존성 α -아밀라아제처럼 특정 이온 의존성이거나 안정성 특성을 가진 효소가 연구되는 이유도, 효소별 조건 민감성이 실제 공정에서 중요하기 때문입니다 [4].

세 번째 오해는 “모든 전분질 원료에서 같은 결과가 나온다”는 것입니다. 옥수수, 쌀, 밀, 카사바는 전분 구조와 비전분 성분이 다르고, 같은 원료라도 분쇄도와 열처리 이력에 따라 효소 접근성이 달라집니다. 유기성 폐기물 생물전환에서 미생물 효소가 다양한 기질을 처리할 수 있다고 해도, 각 기질의 조성도와 물성은 전환 효율에 큰 차이를 만들 수 있습니다 [10].

Enzymes.bio에서 제공되는 방식

Enzymes.bio는 산업용 효소를 온라인으로 공급하는 업체이며, 이 제품을 제조하는 실험실이나 생산 시설로 소개되지 않습니다. **Thermostable Alpha Amylase Enzyme For Industrial Ethanol Production**은 1kg 단위로 온라인에서 직접 구매할 수 있도록 제공되며, 주문 시 제품 문서인 CoA와 SDS가 함께 제공됩니다.

이 문서의 목적은 특정 활성 단위, 시험법, 등급, 제조 조건을 제시하는 것이 아니라, 전분 기반 산업용 에탄올 공정에서 내열성 알파-아밀라아제가 어떤 생화학적 역할을 하는지 명확히 설명하는 것입니다. 구매자는 제품을 “고온 전분 액화와 후속 당화 준비를 위한 효소”로 이해하는 것이 적절하며, 실제 공정 결과는 원료와 운전 조건에 따라 달라질 수 있습니다.



Figure 8. 발표된 전분-에탄올 전환 연구에는 실험실 규모부터 파일럿 및 산업용 발효조 규모까지 평가된 동시 가수분해 및 발효 공정이 포함된다.

핵심 정리

내열성 알파-아밀라아제는 전분 기반 산업용 에탄올 생산에서 고온 액화 단계에 사용되는 효소입니다. 이 효소는 전분 내부의 α -1,4 결합을 절단해 긴 사슬을 덱스트린과 올리고당으로 낮추고, 전분 슬러리의 점도를 줄이며, 후속 당화 효소와 효모 발효가 작동할 수 있는 기질 상태를 조성합니다 [1].

이 효소의 가치는 에탄올을 직접 생성하는 데 있지 않고, 전분질 원료를 발효 가능한 당으로 전환하는 전체 흐름 중 초기 액화 병목을 완화하는 데 있습니다. 옥수수, 쌀, 카사바, 기타 전분질 부산물처럼 전분을 주요 탄수화물로 포함하는 원료에서 특히 관련성이 높으며, 효소 반응의 실제 효과는 원료 조성, 가열 조건, pH, 체류 시간, 후속 당화 및 효모 발효 조건과 함께 해석해야 합니다 [2].

Enzymes.bio의 제품은 1kg 단위 온라인 직접 구매 방식으로 제공되며, 주문 시 CoA와 SDS가 포함됩니다. Enzymes.bio는 제조사나 실험실이 아니므로, 본 설명은 제조 성능 보증이 아니라 산업용 에탄올 생산에서 내열성 알파-아밀라아제의 기능과 과학적 배경을 이해하기 위한 기술 문서입니다.

Thermostable Alpha Amylase Enzyme For Industrial Ethanol Production 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.

[Thermostable Alpha Amylase Enzyme For Industrial Ethanol Production 구매하기 →](#)

참고문헌

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

1. Lonsane, B. K., & Ramesh, M. V. (1990). Production of bacterial thermostable alpha-amylase by solid-state fermentation: a potential tool for achieving economy in enzyme production and starch hydrolysis. *Advances in Applied Microbiology*, 35, 1-56 .
2. Chang, S., Chang, W., Maw-Lee, Yang, T., Yu, N., Chen, C., & Shaw, J. (2010). Simultaneous production of trehalose, bioethanol, and high-protein product from rice by an enzymatic process. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58 5, 2908-14 .
3. Taghizadeh-Alisaraei, A., Motevali, A., & Ghobadian, B. (2019). Ethanol production from date wastes: Adapted technologies, challenges, and global potential. *Renewable Energy*, 143, 1094-1110.
4. Xian, L., Wang, F., Luo, X., Feng, Y., & Feng, J. (2015). Purification and Characterization of a Highly Efficient Calcium-Independent α -Amylase from Talaromyces pinophilus 1-95. *PLoS ONE*, 10.

5. Nahampun, H., Lee, C. J., Jane, J., & Wang, K. (2013). Ectopic expression of bacterial amylopullulanase enhances bioethanol production from maize grain. *Plant Cell Reports*, 32, 1393-1405.
6. Liu, H., Ren, L., Zhuo, H., & Fu, S. (2019). Water Footprint and Water Pinch Analysis in Ethanol Industrial Production for Water Management. *Water*.
7. Aygan, A. (2015). Kahramanmaraş Topraklarından İzole Edilen Bacillus sp. Tarafından Alfa-Amilaz Üretimi ve Karakterizasyonu Production and Characterization of Alfa-Amylase by Bacillus sp. Isolated from Kahramanmaraş Soils.
8. Claes, A., Deparis, Q., Foulquié-Moreno, M. R., & Thevelein, J. (2020). Simultaneous secretion of seven lignocellulolytic enzymes by an industrial second-generation yeast strain enables efficient ethanol production from multiple polymeric substrates. *Metabolic Engineering*.
9. Nogueira, K. M. V., Mendes, V., Carraro, C., Taveira, I. C., Oshiquiri, L. H., Gupta, V., & Silva, R. (2020). Sugar transporters from industrial fungi: Key to improving second-generation ethanol production. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 131, 109991.
10. Anggraini, W. (2025). The Role of Microbial Enzymes in Organic Waste Bioconversion: A Biochemical and Renewable Energy Perspective. *JURNAL PIJAR MIPA*.
11. Arnau, J., Yaver, D., & Hjort, C. (2019). Strategies and Challenges for the Development of Industrial Enzymes Using Fungal Cell Factories. *Grand Challenges in Fungal Biotechnology*, 179 - 210.
12. Duman-Özdamar, Z. E., & Binay, B. (2021). Production of Industrial Enzymes via Pichia pastoris as a Cell Factory in Bioreactor: Current Status and Future Aspects. *The Protein Journal*, 40, 367 - 376.
13. Sun, Z., Wu, Y., Long, S., Feng, S., Jia, X., Hu, Y., Ma, M., ... et al. (2024). Aspergillus oryzae as a Cell Factory: Research and Applications in Industrial Production. *Journal of Fungi*, 10.
14. Liu, X., Xu, W., Mao, L., Zhang, C., Yan, P., Xu, Z., & Zhang, Z. C. (2016). Lignocellulosic ethanol production by starch-base industrial yeast under PEG detoxification. *Scientific Reports*, 6.

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