

Food Grade α -Acetolactate Decarboxylase: 맥주·발효 알코올 공정의 디아세틸 관리용 식품 효소

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

Food Grade α -Acetolactate Decarboxylase, 즉 α -ALDC는 발효 중 생성되는 α -acetolactate를 acetoin으로 직접 전환해 diacetyl 형성 가능성을 낮추는 식품용 효소입니다. 맥주와 일부 발효 알코올 공정에서는 diacetyl이 버터·버터스카치 계열 오프플레이버와 숙성 지연의 원인이 될 수 있으므로, α -ALDC는 향을 덮는 첨가물이 아니라 전구체 경로를 조절하는 공정 효소로 이해하는 것이 정확합니다 [1].

Enzymes.bio는 Food Grade α -Acetolactate Decarboxylase를 1 kg 단위로 온라인 직접 판매하는 공급업체입니다. Enzymes.bio는 제조사나 실험실이 아니며, 주문 시 CoA와 SDS가 함께 제공됩니다.

α -Acetolactate Decarboxylase가 해결하는 핵심 문제

맥주 발효에서 diacetyl은 “조금 있으면 복합미, 많으면 결함”으로 평가되는 대표적인 발효 부산물입니다. 특히 라거, 라이트 맥주, 무알코올·저알코올 맥주, 깨끗한 효모 프로파일을 의도한 에일에서는 버터, 버터스카치, 크림 같은 향이 의도하지 않은 방향으로 나타나기 쉽습니다. α -Acetolactate Decarboxylase는 이 문제를 diacetyl이 생긴 뒤 제거하는 방식이 아니라, **diacetyl의 전구체인 α -acetolactate가 다른 물질로 전환되도록 유도하는 방식**으로 다룹니다 [2].

이 효소의 산업적 의미는 단순한 향미 보정에 그치지 않습니다. 전통적인 양조에서는 diacetyl rest 또는 장기 숙성을 통해 효모가 diacetyl을 다시 흡수·환원하도록 기다립니다. 그러나 발효 탱크와 셀러 공간은 생산량을 제한하는 병목이 되기 쉽고, diacetyl 기준이 늦게 충족되면 여과, 탄산화, 패키징, 출하 일정이 모두 밀릴 수 있습니다. α -ALDC는 전구체 흐름을 조기에 바꾸어 이러한 숙성 부담을 낮추는 데 사용됩니다 [3].

규제적으로도 α -ALDC는 알코올성 맥아 음료와 증류주 생산에서 diacetyl 형성 방지를 위한 가공 보조 효소로 다뤄진 사례가 있습니다. 미국 연방 규정 문서는 α -acetolactate decarboxylase 효소 제제가 α -acetolactate를 acetoin으로 전환함으로써 diacetyl 형성을 방지하는 기술적 목적을 가진다고 설명합니다 [1].

반응 기전: α -acetolactate를 diacetyl 경로에서 acetoin 경로로 전환

발효 중 효모는 아미노산 생합성과 에너지 대사 과정에서 pyruvate를 중심으로 여러 중간체를 만듭니다. 그중 α -acetolactate는 valine 생합성 경로와 연결되는 중간체이며, 세포 밖으로 방출되면 비효소적 산화 탈카복실화 과정을 통해 diacetyl로 전환될 수 있습니다. 이 diacetyl은 효모에 의해 다시 acetoin 및 2,3-butanediol로 환원될 수 있지만, 그 과정에는 시간과 적절한 효모 활성이 필요합니다 [4].

α -Acetolactate Decarboxylase는 이 흐름에서 α -acetolactate를 **diacetyl을 거치지 않고 acetoin으로 직접 탈카복실화**합니다. 핵심은 "diacetyl을 분해한다"가 아니라 "diacetyl이 되기 쉬운 전구체를 먼저 우회 처리한다"는 점입니다. 따라서 α -ALDC의 적용 논리는 완제품의 결함을 사후 보정하는 것이 아니라, 발효 중간 단계에서 오프플레이버 전구체의 운명을 바꾸는 공정 제어입니다 [1].

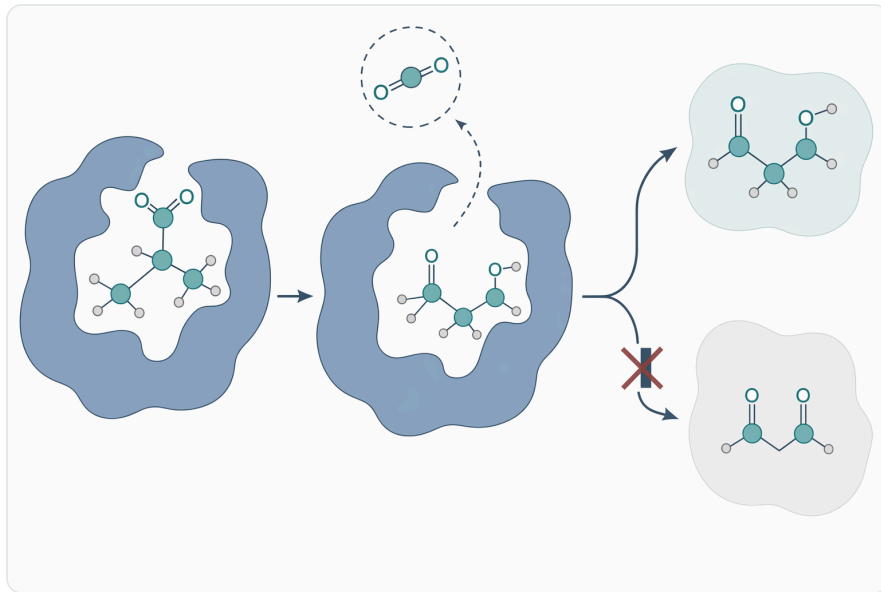


Figure 1. ALDC는 디아세틸이 형성되기 전 단계에서 α -아세토락테이트에 작용해 이 전구체를 아세토인과 이산화탄소로 전환한다.

이 기전은 젖산균 연구에서도 명확하게 드러납니다. *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* biovar *diacetylactis*에서 α -acetolactate decarboxylase가 결핍되거나 불활성화되면 α -acetolactate와 diacetyl 축적이 증가하는 방향으로 관찰되었고, 이는 ALDC 활성이 diacetyl 전구체의 흐름을 낮추는 역할을 한다는 대사적 근거를 제공합니다 [5].

diacetyl 형성 경로와 α -ALDC 개입 지점

구분	일반적인 diacetyl 관리 경로	α -ALDC 적용 시 경로
주요 전구체	α -acetolactate	α -acetolactate

구분	일반적인 diacetyl 관리 경로	α -ALDC 적용 시 경로
전환 방향	α -acetolactate가 산화적으로 diacetyl 형성 가능	α -acetolactate가 acetoin으로 직접 전환
diacetyl 저감 방식	생성된 diacetyl을 효모가 다시 환원하기를 기다림	diacetyl 생성 전 단계에서 전구체를 우회
공정상 의미	숙성 시간, 효모 건강, 온도 관리에 크게 의존	전구체 관리로 숙성 부담을 낮출 수 있음
한계	diacetyl rest가 길어질 수 있음	이미 존재하는 모든 향미 결함을 해결하지는 않음

이 표에서 중요한 차이는 시간축입니다. 기존 방식은 diacetyl이 생성된 뒤 효모 환원 능력에 의존하는 반면, α -ALDC 방식은 α -acetolactate가 diacetyl이 되기 전에 acetoin으로 전환되도록 촉진합니다. 이런 차이 때문에 α -ALDC는 "숙성 시간을 대체한다"기보다 "숙성 중 diacetyl 부담을 줄이는 효소적 전처리"에 가깝습니다 [6].

왜 acetoin인가: 향미와 대사 흐름의 관점

Acetoin은 발효 식품과 음료에서 널리 관찰되는 C4 계열 화합물이며, diacetyl보다 일반적으로 강한 버터스카치 결함으로 문제화되는 정도가 낮습니다. α -ALDC가 α -acetolactate를 acetoin으로 직접 전환하면, diacetyl의 고향미 역치 문제를 피하면서 C4 대사 흐름을 상대적으로 완만한 방향으로 이동시킬 수 있습니다. *Saccharomyces cerevisiae*에서 acetoin 생산을 높이기 위한 대사공학 연구들도 α -acetolactate와 ALDC가 acetoin 형성의 핵심 연결점임을 보여줍니다 [7].

다만 acetoin 자체가 "무향"이라는 뜻은 아닙니다. 공정의 목표는 acetoin을 무제한 늘리는 것이 아니라, diacetyl로 향하는 비효소적 산화 경로를 줄이고 효모·원료·온도·시간 조건과 조합해 원하는 향미 균형을 얻는 것입니다. 최근 연구에서는 ALDC의 입체특이성이 acetoin의 이성질체 구성에도 영향을 줄 수 있음이 논의되어, 이 효소가 단순 탈카복실화 이상의 선택성을 가진 생물촉매임을 보여줍니다 [8].

양조 공정에서의 주요 적용: 맥주, 발효 알코올, 증류주 원액

라거와 저온 발효 맥주

라거 공정에서는 낮은 발효 온도와 깨끗한 향미 목표 때문에 diacetyl 관리가 특히 중요합니다. 저온에서는 효모 대사 속도와 diacetyl 환원 속도가 느려질 수 있고, 결과적으로 숙성 기간이 길어질 수 있습니다. α -ALDC는 α -acetolactate가 축적되기 쉬운 구간에서 acetoin 전환을 촉진해, 이후 숙성

단계에서 diacetyl을 낮추는 부담을 줄이는 데 사용됩니다 [2].

이때 α -ALDC는 맥주 스타일을 획일화하는 효소가 아닙니다. 체코식 라거나 일부 영국식 에일처럼 소량의 diacetyl이 스타일 특성으로 허용되거나 의도되는 경우도 있습니다. 반대로 매우 깨끗한 라거, 라이트 라거, 필스너, 저칼로리 맥주에서는 같은 수준의 diacetyl도 더 두드러지게 감지될 수 있습니다. 따라서 효소의 가치는 "diacetyl이 낮을수록 무조건 좋다"가 아니라, 의도한 제품 프로파일에 맞게 전구체 리스크를 낮추는 데 있습니다 [3].

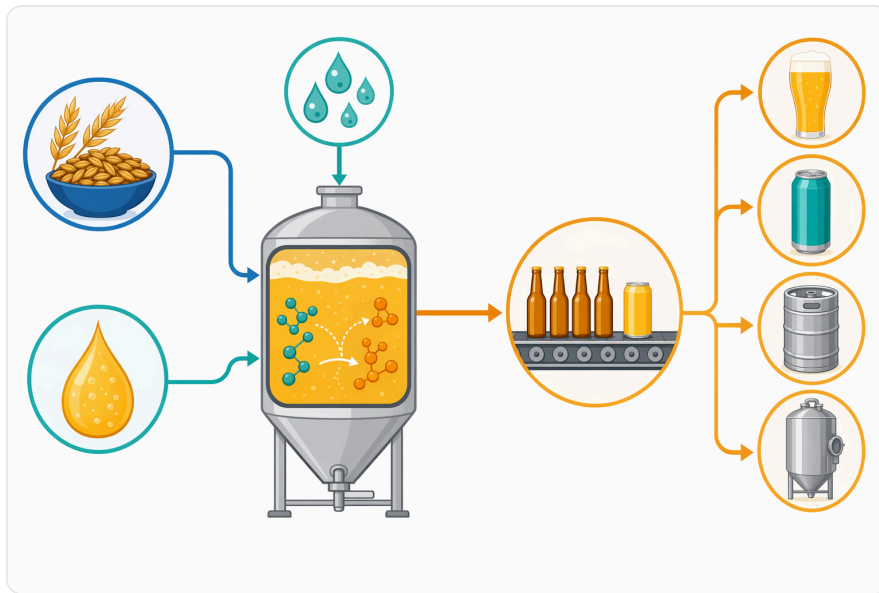


Figure 2. 디아세틸 위험은 전구체 배출, 화학적 전환, 시간에 따른 효모의 제거 과정을 거치며 발생하는 반면, ALDC는 이취 성분이 축적되기 전에 개입한다.

고회전 생산과 셀러 병목 완화

상업 양조장에서 diacetyl 관리는 품질 문제인 동시에 설비 운영 문제입니다. 발효가 당도 기준으로 끝났더라도 diacetyl이 기준 이하로 내려가지 않으면 탱크를 비울 수 없고, 이후 배치가 지연됩니다. 효소를 통한 diacetyl 전구체 관리는 이런 탱크 점유 시간을 줄이는 방향으로 설계될 수 있으며, diacetyl control enzyme이 숙성 시간 단축과 공정 효율을 목적으로 사용된다는 산업 자료도 제시되어 있습니다 [9].

하지만 효소 적용이 공정 관리를 대신하지는 않습니다. 효모 피칭량, 산소 공급, FAN, 아연 등 영양 조건, 발효 온도, 압력, 효모 회수 상태가 나쁘면 diacetyl 이외의 황화합물, 아세트알데하이드, 고급 알코올, 산화취가 동시에 문제될 수 있습니다. α -ALDC는 그중 α -acetolactate-diacetyl 축에 특화된 효소이므로, 전체 발효 품질 관리와 함께 사용될 때 의미가 큼니다 [4].

증류주용 발효액

미국 규정상 α -acetolactate decarboxylase는 알코올성 맥아 음료뿐 아니라 증류주 생산에서도 특정 용도의 가공 보조제로 언급됩니다 [1]. 증류 공정에서는 최종적으로 휘발성 성분의 분리가 일어나지만, 발효액의 부산물 조성은 증류 컷, 향미 전구체, 공정 안정성에 영향을 줄 수 있습니다. 따라서 증류주 원액에서도 diacetyl 전구체 관리는 발효 품질의 일관성을 높이는 하나의 선택지가 될 수 있습니다.

증류주 공정에서 α -ALDC의 의미는 맥주와 약간 다릅니다. 맥주는 최종 음료 자체에서 diacetyl이 감각적으로 평가되지만, 증류주는 발효액, 증류 조건, 숙성, 블렌딩이 복합적으로 작용합니다. 그럼에도 α -acetolactate에서 diacetyl로 이어지는 전구체 흐름을 줄인다는 효소의 1차 작용은 동일합니다 [1].

식품용 효소로서의 안전성 평가와 규제적 맥락

식품 효소는 단순히 "천연 단백질"이라는 이유만으로 사용되는 것이 아니라, 생산 균주, 제조 공정, 잔류 불순물, 독성학적 자료, intended use를 기준으로 평가됩니다. EFSA는 genetically modified *Bacillus licheniformis* strain NZYM-JB에서 생산된 acetolactate decarboxylase 식품 효소의 안전성을 평가한 바 있으며, 의도된 사용 조건에서 안전성 우려가 없다는 결론을 제시했습니다 [10].

또 다른 EFSA 평가에서는 genetically modified *Bacillus subtilis* strain DP-Ezz65에서 생산된 acetolactate decarboxylase 식품 효소가 검토되었습니다. 이런 문헌은 "ALDC라는 효소명"만이 아니라, 실제 식품 효소에서는 생산 균주와 제조 배경까지 평가 대상이 된다는 점을 보여줍니다 [11].

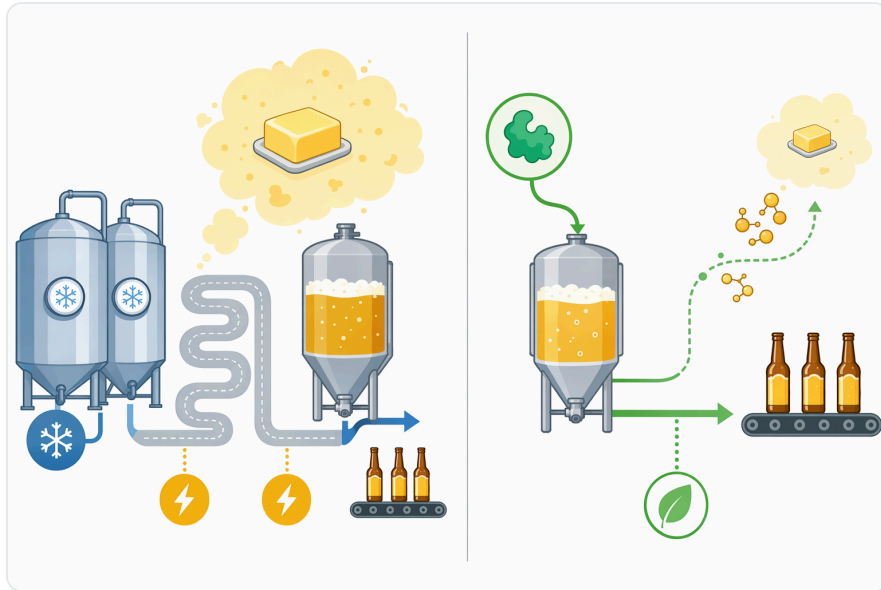


Figure 3. 예방적 ALDC 처리는 디아세틸의 후속 효모 환원에만 의존하는 대신 α -아세토락테이트 풀을 줄인다는 점에서 전통적인 디아세틸 관리와 다르다.

미국 규정 문서도 α -acetolactate decarboxylase를 특정 알코올 음료 생산에서 diacetyl 형성 방지를 위한 secondary direct food additive로 다룹니다 [1]. 여기서 중요한 해석은 규제 문서가 효소의 기술적 목적과 사용 범위를 설명한다는 점이지, 모든 지역·모든 식품·모든 제품 배합에 자동으로 같은 조건이 적용된다는 뜻은 아니라는 점입니다.

Enzymes.bio의 제품 설명에서 "Food Grade"는 식품·음료 공정용 효소로 공급되는 품목이라는 의미로 이해해야 합니다. Enzymes.bio는 제조사나 실험실이 아니며, 특정 생산 균주나 제조 공정을 자체 개발했다고 주장하지 않습니다. 주문 시 제공되는 CoA와 SDS는 취급 및 내부 문서화에 활용되는 기본 제품 문서입니다.

연구 문헌이 보여주는 α -ALDC의 대사적 중요성

α -ALDC의 중요성은 양조 현장에만 국한되지 않습니다. Lactococcus lactis 연구에서는 α -acetolactate decarboxylase 결핍과 낮은 lactate dehydrogenase 활성을 조합하면 α -acetolactate와 diacetyl 과생산이 나타날 수 있음이 보고되었습니다. 이는 ALDC가 존재할 때와 없을 때 C4 향미화합물의 흐름이 크게 달라진다는 사실을 보여줍니다 [4].

또한 α -ALDC 결핍 Lactococcus lactis 돌연변이를 선별해 diacetyl 형성을 개선하려는 연구들은 식품 발효에서 ALDC가 "줄여야 할 효소"가 되기도 한다는 점을 보여줍니다. 버터 풍미가 필요한 발효 유제품에서는 diacetyl 생성이 긍정적일 수 있기 때문입니다. 반대로 맥주에서는 같은 diacetyl이 오프플레이버가 되므로, ALDC를 외부 효소로 활용해 전구체를 낮추는 방향이 선택됩니다 [12].

Enterobacter cloacae를 이용한 diacetyl 생산 연구와 구조-기능 연구도 α -acetolactate, diacetyl, acetoin이 서로 연결된 대사 네트워크 안에 있음을 보여줍니다. 특히 ALDC의 구조-기능 관계 연구는 이 효소가 단순한 공정 보조제가 아니라, 기질 인식과 탈카복실화 선택성이 연구되는 전문 생물 촉매임을 뒷받침합니다 [13].

효모와 미생물 생산 플랫폼에서의 acetoin·butanediol 경로

최근 생물공정 연구에서는 Saccharomyces cerevisiae, Bacillus, Zymomonas mobilis, Corynebacterium glutamicum 등 다양한 미생물을 이용해 acetoin 또는 2,3-butanediol을 생산하려는 시도가 이어지고 있습니다. 이들 연구에서 α -acetolactate는 pyruvate에서 C4 화합물로 이어지는 중심 중간체로 자주 등장하며, ALDC는 acetoin 방향으로 탄소 흐름을 당기는 주요 효소로 쓰입니다 [14].

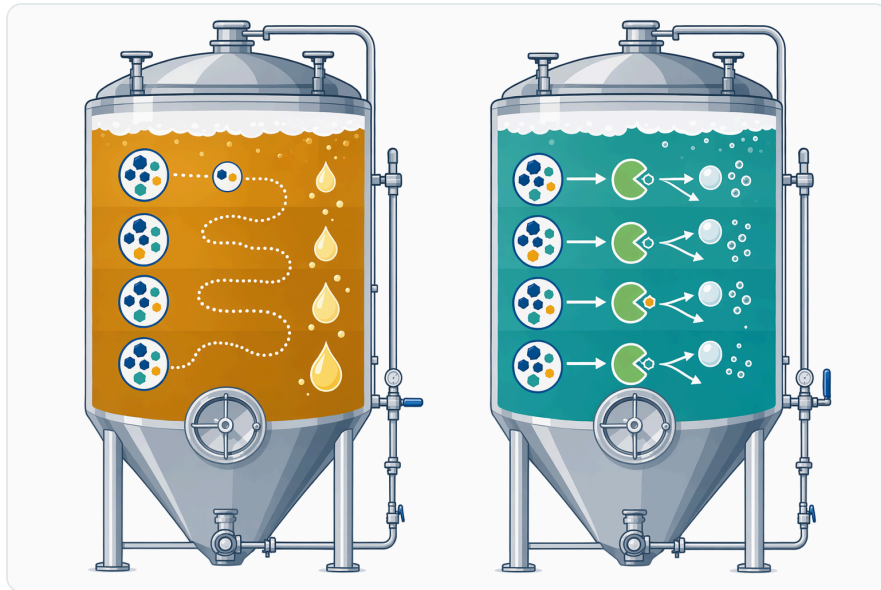


Figure 4. 양조 연구들은 발효 중 ALDC 활성을 활용하면 디아세틸로 이어지는 경로를 줄일 수 있음을 뒷받침한다.

예를 들어 Saccharomyces cerevisiae에서 2,3-butanediol dehydrogenase를 조절하거나 NADH 산화 효소를 발현해 acetoin 생산을 높이는 연구는, acetoin 축적이 단일 효소만으로 결정되지 않고 환원력 균형, 부산물 경로, 세포 내 산화환원 상태와 함께 움직인다는 점을 보여줍니다 [7]. 양조에서 α -ALDC를 사용할 때도 이 원리는 중요합니다. 효소가 α -acetolactate 전환을 촉진하더라도, 최종 향미는 효모의 전체 대사 상태와 함께 결정됩니다.

Bacillus methanolicus, Corynebacterium glutamicum, Zymomonas mobilis 같은 비양조 미생물 연구는 α -ALDC가 식품 음료뿐 아니라 산업 생명공학에서 acetoin 생산 모듈로 평가된다는 점을 보여줍니다 [15]. 이러한 연구들은 맥주 적용의 직접적 성능을 보장하는 자료는 아니지만, α -acetolactate-acetoin 경로의 생화학적 타당성을 강화하는 배경 근거로 볼 수 있습니다.

공정 적용 시 이해해야 할 변수

α -ALDC는 기질인 α -acetolactate가 존재해야 작동합니다. 따라서 효소가 의미 있게 작용하려면 발효 중 α -acetolactate가 형성되는 시간대와 효소가 기질에 접근할 수 있는 조건이 맞아야 합니다. 일반적으로 발효 초·중기 전구체 형성 단계에서의 적용이 논리적이지만, 실제 적용 조건은 맥주 조성, 효모주, 발효 온도, 교반 또는 대류 상태, 효모 세포의 방출 패턴에 따라 달라질 수 있습니다 [2].

온도와 pH도 효소 반응의 기본 변수입니다. 효소 단백질은 특정 환경에서 구조와 활성이 유지되며, 지나치게 불리한 pH, 온도, 알코올 농도, 금속 이온, 단백질 변성 조건에서는 기대한 전환이 제한될 수 있습니다. 다만 이 문서는 특정 활성 단위, 분석법, 투입량, 단위 정의를 제공하지 않습니다. Enzymes.bio는 공급업체이며, 제품은 온라인 판매 단위로 제공되고 주문 시 CoA와 SDS가 함께 제공됩니다.

맥주 원료 측면에서는 FAN과 효모 영양 상태가 diacetyl 동역학에 영향을 미칩니다. 영양 상태가 불균형하면 α -acetolactate 방출이 늘거나 diacetyl 환원이 지연될 수 있습니다. α -ALDC는 이런 조건에서 전구체를 줄이는 데 도움을 줄 수 있지만, 부족한 효모 관리나 오염 문제를 보상하는 범용 해결책은 아닙니다 [3].

공정 목적별 α -ALDC 적용 의미

공정 상황	diacetyl 리스크	α -ALDC의 역할	기대 가능한 운영 효과
저온 라거 발효	환원 속도가 느려 숙성 기간이 길어질 수 있음	α -acetolactate를 acetoin으로 우회	diacetyl rest 부담 완화 가능
라이트·클린 프로파일 맥주	낮은 농도에서도 향미 결함이 두드러짐	전구체 단계에서 오프플레이버 가능성 저감	향미 일관성 향상
고회전 생산	탱크 점유 시간이 병목이 될 수 있음	숙성 중 diacetyl 형성 부담 감소	셀러 운용 예측성 향상
증류주용 발효액	발효 부산물 조성이 공정 품질에 영향	C4 전구체 흐름 제어	발효액 품질 관리 보조

이 비교는 α -ALDC가 단일 목적 효소라는 점을 분명히 합니다. 향미를 만들기 위한 효소가 아니라, 원치 않는 diacetyl 전구체를 acetoin 쪽으로 돌리는 효소입니다. 따라서 적용의 성공 여부는 “효소를 넣었는가”보다 “diacetyl이 공정상 병목이 되는 구간에 효소 반응이 충분히 작동했는가”에 달려 있습니다 [6].



Figure 5. ALDC는 버터 향이 바람직하지 않은 라거, 필스너, 라이트 라거, 켈 슈 스타일 맥주, 깔끔한 에일 및 기타 음료처럼 깔끔한 향미 프로필을 지향하는 발효에 특히 적합하다.

고정화 효소 연구가 시사하는 공정 안정성

최근에는 α -ALDC를 젤라틴/알지네이트 또는 키토산 지지체에 고정화해 맥주의 diacetyl 오프플레이버를 낮추려는 연구도 보고되었습니다. 이러한 연구는 효소를 반복 사용하거나 공정 중 안정성을 높이는 방향을 탐색한 것으로, ALDC가 양조 공정에서 실질적인 기술 타겟으로 간주된다는 점을 보여줍니다 [6].

키토산 고정화 α -ALDC 연구에서도 맥주 오프플레이버 예방을 위한 안정한 생축매로서의 가능성이 논의되었습니다 [16]. 다만 Enzymes.bio의 Food Grade α -Acetolactate Decarboxylase는 온라인 공급 품목으로 소개되는 효소 제품이며, 이 문헌에서 다른 특정 고정화 시스템이나 실험 조건을 제품 성능으로 주장하는 것은 아닙니다.

고정화 연구의 실무적 가치는 효소 안정성, 접촉 시간, 회수 가능성, 매트릭스와 효소의 상호작용이 ALDC 적용에서 중요한 변수임을 보여준다는 데 있습니다. 액상 또는 분말 효소를 사용하는 일반 양조 공정에서도 동일하게, 효소가 기질을 만나는 위치와 시간이 결과를 좌우합니다 [16].

α -ALDC가 하지 않는 일: 범위의 명확화

α -ALDC는 이미 산화, 오염, 원료 열화, 위생 실패, 효모 스트레스 전반으로 발생한 모든 향미 결함을 제거하는 효소가 아닙니다. 예를 들어 황화수소, DMS, 아세트알데하이드, 산화취, 페놀성 오프플레이버는 각각 다른 원인과 관리 지점을 갖습니다. α -ALDC의 1차 표적은 α -acetolactate이며, 그 결과 diacetyl 형성 가능성을 낮추는 것입니다 [1].

또한 α -ALDC가 diacetyl을 직접 분해하는 효소라고 이해하면 적용 시점을 잘못 잡을 수 있습니다. diacetyl이 이미 많이 형성된 뒤라면 효모 환원, 온도, 시간, 재발효 조건 등이 더 큰 영향을 가질 수 있습니다. ALDC는 전구체 관리 효소이므로 발효 중 α -acetolactate가 생성되는 단계와 연결해 이해해야 합니다 [5].

마지막으로, 식품용 효소 사용은 지역 규정과 제품 카테고리에 따라 달라질 수 있습니다. 미국 규정 문서와 EFSA 안전성 평가는 중요한 근거이지만, 특정 시장에서의 라벨링, 가공보조제 지위, 허용 범위는 별도로 관리되어야 합니다 [10].

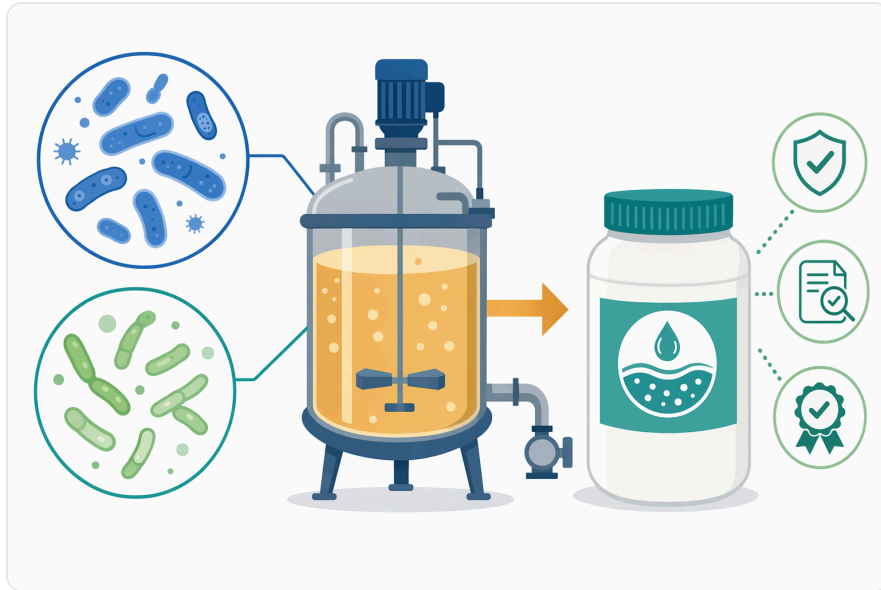


Figure 6. ALDC는 미생물, 생산, 구조 및 안전성 평가 문헌으로 뒷받침되는 확립된 식품 효소 범주이다.

Enzymes.bio 제품 안내

Enzymes.bio의 **Food Grade α -Acetolactate Decarboxylase**는 맥주 및 발효 알코올 공정에서 diacetyl 전구체 관리를 목표로 하는 식품용 효소입니다. 제품은 **1 kg 단위로 온라인에서 직접 구매** 할 수 있으며, 주문 시 **CoA와 SDS가 함께 제공됩니다.**

Enzymes.bio는 제조사나 실험실이 아니라 효소 공급업체입니다. 따라서 이 문서는 특정 제조 공정, 자체 분석법, 활성 단위 정의, 실험실 시험 조건을 설명하기 위한 자료가 아니라, α -ALDC의 작동 원리와 식품·음료 공정에서의 기술적 의미를 이해하기 위한 제품 교육 자료입니다.

결론: diacetyl을 사후 처리하는 효소가 아니라 전구체 경로를 바꾸는 효소

Food Grade α -Acetolactate Decarboxylase의 핵심 가치는 발효 중 α -acetolactate를 acetoin으로 직접 전환해 diacetyl 형성 가능성을 낮추는 데 있습니다. 이 작용은 diacetyl이 이미 생긴 뒤 향을 가리는 방식이 아니라, 발효 전구체 단계에서 오프플레이버 경로를 줄이는 생화학적 접근입니다 ^[1].

맥주와 발효 알코올 공정에서 α -ALDC는 숙성 시간, 셀러 운영, 포장 전 품질 기준, 깨끗한 향미 프로파일 관리와 직접 연결됩니다. 다만 효소 성능은 효모 상태, 원료 조성, 발효 온도, 접촉 시간, 공정 설계에 따라 달라지므로, α -ALDC는 전체 발효 품질 관리 체계 안에서 사용해야 하는 전문 공정 효소로 이해하는 것이 가장 정확합니다 ^[2].

Enzymes.bio는 Food Grade α -Acetolactate Decarboxylase를 1 kg 단위로 온라인 공급하며, 주문 시 CoA와 SDS를 함께 제공합니다. 이 제품은 diacetyl 전구체 관리와 향미 일관성 확보가 중요한 양조 및 발효 알코올 공정에 적합한 효소 솔루션입니다.

Food Grade A-Acetolactate Decarboxylase 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.

[Food Grade A-Acetolactate Decarboxylase 구매하기 →](#)

참고문헌

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

1. Secondary Direct Food Additives Permitted In Food For Human Consumption Alpha Acetolactate. Federalregister.
2. Choi, E., Ahn, H., & Kim, W. (2015). Effect of α -acetolactate decarboxylase on diacetyl content of beer. Food Science and Biotechnology, 24, 1373-1380.
3. Diacetyl Control. Novonesis.
4. Monnet, C., Aymes, F., & Corrieu, G. (2000). Diacetyl and α -Acetolactate Overproduction by Lactococcus lactis subsp. lactis Biovar Diacetylactis Mutants That Are Deficient in α -Acetolactate Decarboxylase and Have a Low Lactate Dehydrogenase Activity. Applied and Environmental Microbiology, 66, 5518 - 5520.
5. Aymes, F., Monnet, C., & Corrieu, G. (1999). Effect of α -acetolactate decarboxylase inactivation on α -acetolactate and diacetyl production by Lactococcus lactis subsp. lactis biovar diacetylactis. Journal of

Bioscience and Bioengineering, 87, 87-92.

6. Costa, G., Queiroz, L., Manfroi, V., Rodrigues, R., & Hertz, P. (2023). Immobilization of Alpha Acetolactate Decarboxylase in Hybrid Gelatin/Alginate Support for Application to Reduce Diacetyl Off-Flavor in Beer. *Catalysts*.
7. Bae, S., Kim, S., & Hahn, J. (2016). Efficient production of acetoin in *Saccharomyces cerevisiae* by disruption of 2,3-butanediol dehydrogenase and expression of NADH oxidase. *Scientific Reports*, 6.
8. Cha, S., Jang, B., Lee, D., Cho, I., Park, W., Lee, Y., Shin, H., ... et al. (2025). Efficient (S)-acetoin production in *Saccharomyces cerevisiae* by modulating α -acetolactate decarboxylase stereospecificity. *Bioresource Technology*, 434, 132767 .
9. Diacetyl Control Enzyme - Gusmer Enterprises, Inc. *Gusmerenterprises*.
10. Silano, V., Baviera, J. M. B., Bolognesi, C., Brüscheiler, B., Cocconcelli, P., Crebelli, R., Gott, D., ... et al. (2018). Safety evaluation of the food enzyme acetolactate decarboxylase from a genetically modified *Bacillus licheniformis* (strain NZYM-JB). *EFSA journal. European Food Safety Authority*, 16.
11. Zorn, H., Baviera, J. M. B., Bolognesi, C., Catania, F., Gadermaier, G., Greiner, R., Mayo, B., ... et al. (2025). Safety evaluation of the food enzyme acetolactate decarboxylase from the genetically modified *Bacillus subtilis* strain DP-Ezz65. *EFSA journal. European Food Safety Authority*, 23.
12. Curic, M., Stuer-Lauridsen, B., Renault, P., & Nilsson, D. (1999). A General Method for Selection of α -Acetolactate Decarboxylase-Deficient *Lactococcus lactis* Mutants To Improve Diacetyl Formation. *Applied and Environmental Microbiology*, 65, 1202 - 1206.
13. Ji, F., Feng, Y., Li, M., Yang, Y., Wang, T., Wang, J., Bao, Y., ... et al. (2018). Studies on structure-function relationships of acetolactate decarboxylase from *Enterobacter cloacae*. *RSC Advances*, 8, 39066 - 39073.
14. Bao, W., Shen, W., Peng, Q., Du, J., & Yang, S. (2023). Metabolic Engineering of *Zymomonas mobilis* for Acetoin Production by Carbon Redistribution and Cofactor Balance. *Fermentation*.
15. Drejer, E. B., Chan, D., Haupka, C., Wendisch, V., Brautaset, T., & Irla, M. (2020). Methanol-based acetoin production by genetically engineered *Bacillus methanolicus*. *Green Chemistry*, 22, 788-802.
16. Costa, G., Spolidoro, L. S., Manfroi, V., Rodrigues, R., & Hertz, P. (2022). α -Acetolactate decarboxylase immobilized in chitosan: A highly stable biocatalyst to prevent off-flavor in beer. *Biotechnology progress (Print)*, 38.


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

