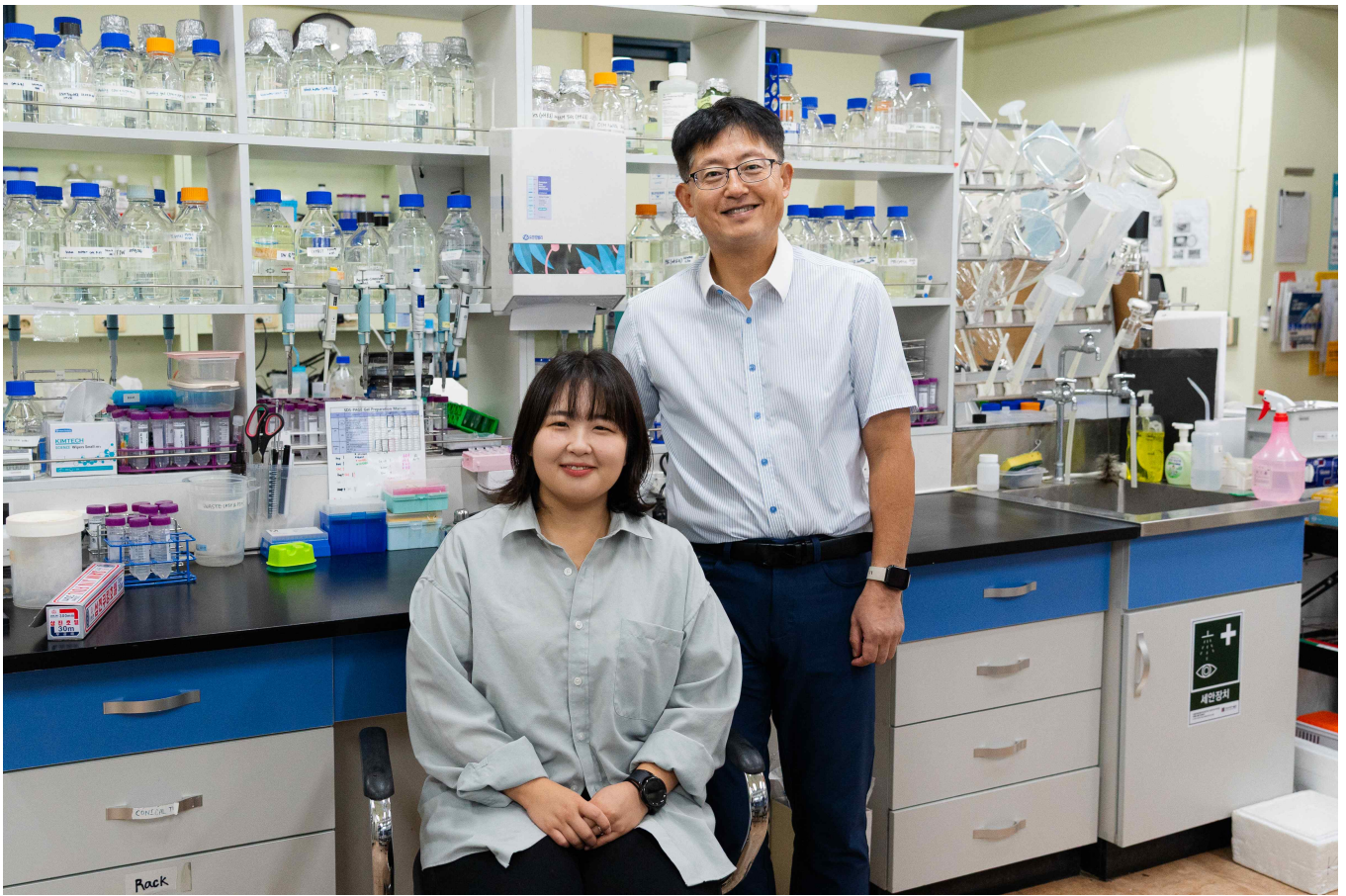


“설탕 찌꺼기가 달콤한 부가가치로” GIST, 버려지는 사탕수수 부산물로 고부가가치 ‘D-만니톨’ 친환경 생산 성공

- 신소재공학과 권인찬 교수팀, 사탕수수 정제 과정에서 나오는 당밀을 효소 반응만으로 D-만니톨로 전환하는 친환경 바이오 전환 기술 개발... 반응 중 생성되는 D-글루코노락톤도 부가가치 화합물로 활용 가능
- 높은 전환 효율(92~95%)과 효소 안정성 입증함으로써 기존 미생물 발효법 대비 반응 속도와 선택성 향상, 부산물 최소화로 경제성·환경성 확보... 국제학술지 《Industrial Crops and Products》 게재

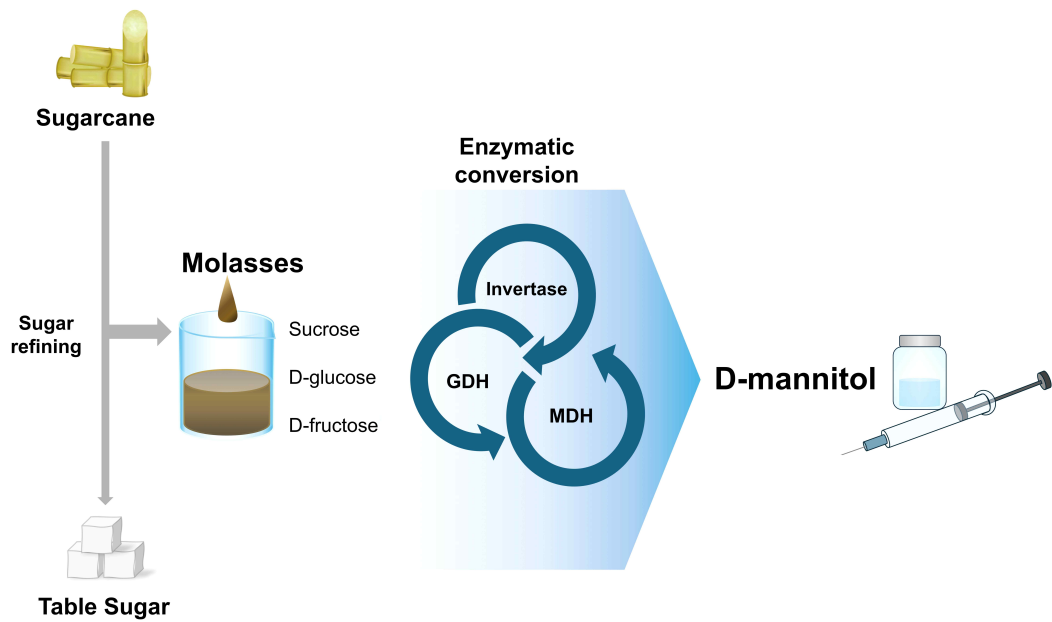


▲ (왼쪽부터) GIST 신소재공학과 박현선 통합과정 학생, 권인찬 교수

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 신소재공학과 권인찬 교수 연구팀이 사탕수수 정제 과정에서 나오는 부산물 ‘당밀(molasses)’을 효소 반응만으로 고부가가치 물질인 ‘D-만니톨(D-mannitol)’로 전환하는 친환경 바이오 전환 기술을 개발했다고 밝혔다.

D-만니톨은 천연 당알코올(sugar alcohol)의 일종으로, 식품·의약·화장품 등 다양한 산업에서 감미료·안정제·치료제 등으로 쓰이는 고부가가치 기능성 물질이다.

이번 연구 성과는 버려지는 농업 부산물을 새 자원으로 재활용(업사이클링)하여 순환경제 실현과 산업 경쟁력 강화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.



▲ **설탕 정제 부산물인 당밀을 만니톨로 업사이클링 하기 위한 효소적 전환.** 사탕수수로부터 설탕을 생산, 정제하는 과정에서 발생하는 부산물인 당밀을 인버타아제, MDH, GDH 삼중 효소 복합반응을 통해 저칼로리 감미료이자 약물인 만니톨 생산.

설탕 산업은 매년 막대한 양의 부산물을 배출한다. 사탕수수나 사탕무를 가공할 때 생성되는 ‘당밀’은 설탕 외에도 포도당, 과당, 무기물 등이 섞인 점성 높은 부산물이다.

그러나 대부분 가축 사료나 저가의 에탄올 원료로만 이용되어, 고부가가치 활용은 이뤄지지 못했다.

이런 부산물을 새로운 자원으로 전환하는 기술은 환경 문제 해결과 산업 경쟁력 강화를 동시에 달성할 핵심 전략으로 주목받고 있다.

특히 당밀은 당 함량이 높아 바이오화학 원료로 재활용할 잠재력이 매우 크며, 이를 활용한 D-만니톨 생산은 버려지는 부산물을 산업 자원으로 되살리는 대표적인 예가 될 수 있다.

기존에는 주로 미생물 발효법으로 당밀에서 D-만니톨을 생산하는 연구가 진행돼 왔으나, 과당의 일부가 미생물 성장과 유지에 소비되어 전환율이 떨어지고, 젖산·에탄올 등 불필요한 부산물이 함께 만들어지는 문제가 있었다.

실제로 기존 발효법의 효율은 이론적 최대치(100%)의 60~90% 수준에 머물렀다.

이에 연구팀은 화학 처리 없이 효소 반응만으로 당밀을 D-만니톨로 전환하는 ‘3단계 효소 반응 시스템’을 새롭게 설계했다.

이 시스템은 인버타아제*, 만니톨 환원 효소(MDH)*, 포도당 환원 효소(GDH)* 등 세 가지 효소가 자연의 촉매 역할을 하며 단계적으로 작용해 자당 → 포도당·과당 → D-만니톨로 이어지는 연쇄 반응을 유도한다.

- * **인버타아제(Invertase):** 자당을 포도당, 과당으로 분해하는 효소
- * **만니톨 환원 효소(Mannitol dehydrogenase, MDH):** 과당과 만니톨 사이의 산화-환원 반응을 촉매하는 효소
- * **포도당 환원 효소(Glucose dehydrogenase, GDH):** 포도당을 산화시키며, 보조인자인 NADH를 생산할 수 있는 효소

연구팀은 반응 과정에서 소비되는 보조인자(NADH)*를 포도당 환원 효소(GDH)가 포도당을 산화시키며 실시간으로 재생하도록 설계함으로써, 외부에서 추가적인 보조인자를 공급할 필요가 없는 자급형 시스템을 구현했다.

먼저, 인버타아제는 당밀에 풍부한 자당을 포도당과 과당으로 분해하는 역할을 한다. 이렇게 분해된 단당류는 이후 단계에서 다른 효소 반응의 기초 원료로 활용할 수 있는 형태가 된다.

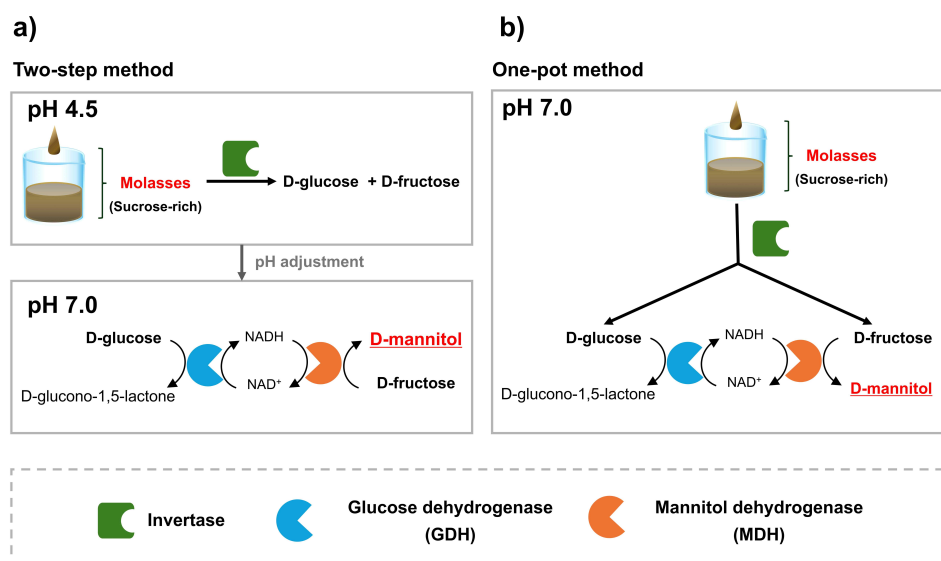
다음으로, 만니톨 환원 효소(MDH)가 과당을 직접 D-만니톨(D-mannitol)로 전환하는 핵심 반응을 수행한다. 이때 반응을 지속시키기 위해서는 효소의 '연료' 역할을 하는 보조인자(NADH)가 반드시 필요하다.

여기서 세 번째 효소인 포도당 환원 효소(GDH)가 중요한 역할을 한다. **GDH는 당밀 속 포도당을 산화시키며 자연스럽게 보조인자(NADH)를 재생하고**, 이를 통해 만니톨 환원 효소(MDH)가 끊임없이 과당을 만니톨로 바꿀 수 있도록 돕는다.

이처럼 세 효소가 단계적으로 작용하는 연쇄 반응 시스템을 통해, 당밀 내 다양한 당 성분을 효율적으로 활용할 수 있다. 그 결과, 고가의 화학물질을 쓰거나 원료를 미리 처리하는 복잡한 공정 없이도 친환경적이고 경제적인 바이오 전환이 가능하다.

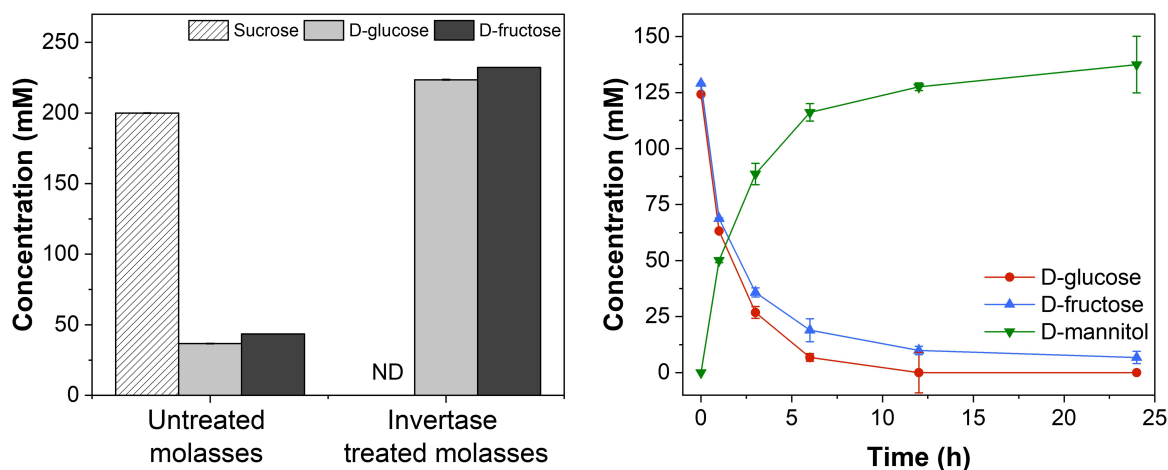
* **보조인자(NADH):** 효소 반응이 원활히 일어나도록 돕는 '화학적 연료' 역할을 하는 분자다. 정식 명칭은 니코틴아마이드 아데닌 다이뉴클레오타이드의 환원형(Nicotinamide Adenine Dinucleotide, reduced form)으로, 효소가 작용할 때 필요한 에너지 전달자이자 반응 촉진제다.

연구팀은 두 가지 방식의 효소 반응 시스템을 구축해 성능을 비교했다.



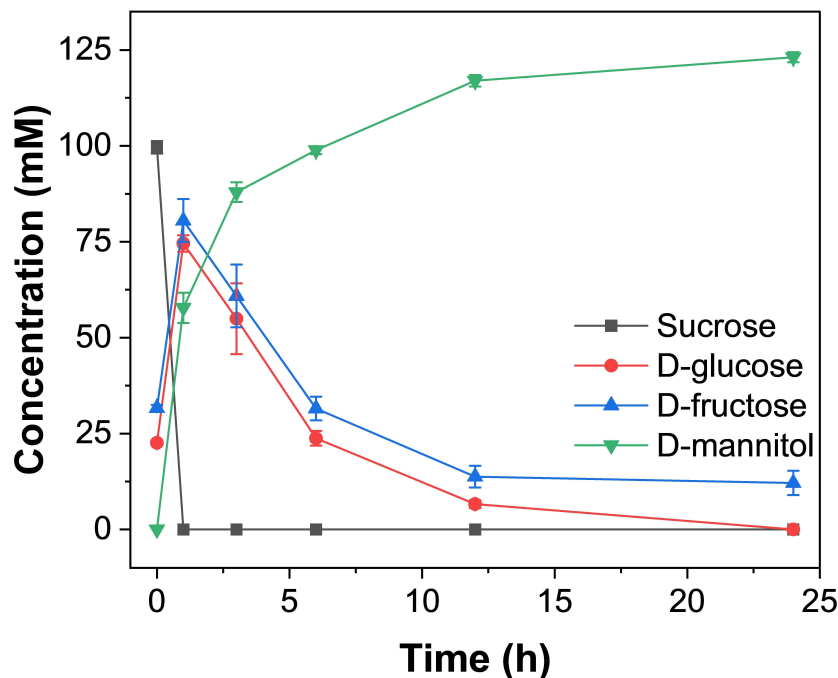
▲ 삼중 효소 복합 반응의 최적화를 위한 2가지 방법. 최적 활성 조건이 서로 다른 효소들을 효율적으로 활용하기 위해, 효소 사용량을 최소화할 수 있는 Two-step 공정과 공정 단순화를 위한 One-pot 공정을 구축하였다.

먼저, 각 효소가 가장 잘 작동하는 조건을 단계별로 적용한 2단계(two-step) 공정에서는 D-만니톨이 137 mM 생성되어 약 92%의 전환 효율을 보였다.



▲ Two-step 방법을 이용한 시간에 따른 만니톨 생산.

반면, 모든 효소를 한 번에 섞어 반응시키는 원팟(one-pot) 공정에서도 123 mM의 D-만니톨이 생성되어 95% 수준의 높은 효율을 기록했다.



▲ One-pot 방법을 이용한 만니톨 생산.

특히 효소들이 당밀에 포함된 다양한 성분 속에서도 안정적으로 작용했으며, 불순물 제거나 희석 같은 별도 처리 과정 없이도 반응이 원활히 진행돼, 당밀을 원료 그대로 변환할 수 있는 효소 시스템을 입증했다.

* mM: 밀리몰 농도(millimolar concentration)의 약자로, 용액 1리터(L) 안에 137 밀리몰(mmol)의 물질이 녹아 있다는 뜻이다.

또한, 반응 과정에서 포도당이 산화되며 생성되는 D-글루코노락톤 (D-gluconolactone)이 또 다른 부가가치 화합물로 활용될 수 있음을 확인했다.

이를 통해 하나의 공정으로 두 가지 고부가 화합물을 동시 생산할 수 있는 기술적 장점을 제시했다.

연구팀이 개발한 효소 기반 기술은 기존 미생물 발효 기반 생산 방식보다 반응 속도와 선택성이 높고, 불필요한 부산물이 거의 없어 공정 단순화·경제성·환경성을 모두 확보한 지속가능형 바이오제조 기술로 평가된다.

권인찬 교수는 "이번 연구는 폐기되던 산업 부산물로부터 고부가가치 화합물을 얻을 수 있는 업사이클링 기술로, 환경친화성과 경제성을 동시에 확보했다"며, "향후 식품·의약·에너지 등 다양한 산업 분야에서 지속 가능한 바이오생산 공정으로 확대될 것으로 기대된다"고 말했다.

GIST 신소재공학과 권인찬 교수가 지도하고 박현선 통합과정생이 수행한 이번 연구는 한국연구재단 선도연구센터 사업과 박사과정생연구장려금지원사업의 지원을 받았다. 연구 결과는 국제학술지 《Industrial Crops and Products》에 2025년 9월 30일 온라인으로 게재됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과가 학술적 의의와 함께 산업적 응용 가능성까지 고려한 것으로, 기술이전 관련 협의는 기술사업화센터(hgmoon@gist.ac.kr)를 통해 진행할 수 있다고 밝혔다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Industrial Crops and Products (IF: 6.2, 농학 분야 상위 5%, 2024년 기준)
- 논문명 : Upcycling agro-industrial biomass molasses into D-mannitol via an enzymatic cascade with in situ cofactor regeneration.
- 저자 정보 : 박현선(제1저자, 신소재공학과), 박지민(제2저자, 신소재공학과 졸업생), 권인찬(교신저자, 신소재공학과)