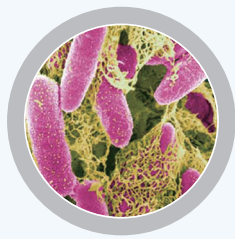
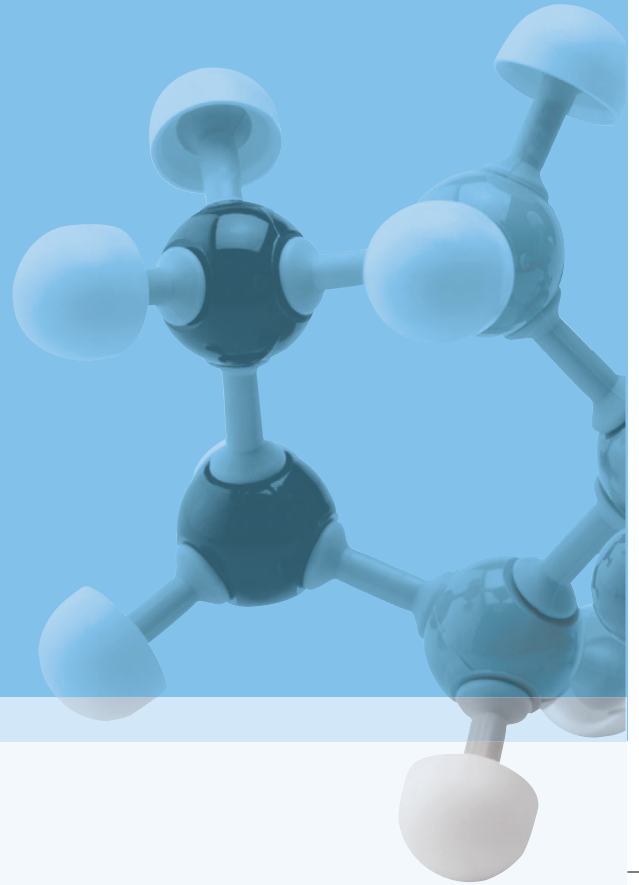


Ⅱ 물질대사

- 01 효소
- 02 광합성
- 03 세포호흡



단원안내

모든 생물은 에너지의 지속적인 공급을 요구한다. 그 에너지를 이용하여 필요한 물질을 만들고, 그 만들어진 물질을 다른 생물체가 의존하게 된다. 생물체 내에서 일어나는 에너지를 수반하는 모든 화학반응을 물질대사라고 한다.

1. 효소

01. 물질대사

02. 효소



세계적 피겨 스케이팅 선수 김연아 피겨 스케이팅은 많은 에너지가 소모되는 운동이다.

많은 어른들은 우유 속에 들어있는 젖당을 소화시키지 못해, 섭취 시 소화 불량에 시달리게 된다. 그 이유는 젖당 가수분해효소(lactase)가 결핍되어 젖당 과민성을 보이기 때문이다. 이 효소는 포유동물들의 수유기 동안에는 정상적으로 생산되는데, 그 이후에는 점점 감소하게 된다. 물론 예외적으로 북유럽 사람들은 이렇게 급격한 감소를 보이지 않기 때문에 우유를 섭취하는데 어려움을 겪지 않게 된다. 젖당 가수분해효소가 부족한 사람이 젖당을 섭취하게 되면 젖당은 소화되지 않고 고스란히 대장까지 이동하여 미생물의 에너지원으로 사용된다. 이 과정에서 메테인(CH_4), 수소(H_2)가 발생하게 되고 장이 팽창하는 불편감과 또 다른 생성물인 젖산에 의한 삼투효과로 장 안에 수분의 함량이 증가하여 설사가 나게 된다. 한 종류의 효소가 이렇게 인간생활에서 중요한 역할을 수행한다. 어떻게 이러한 일들이 가능한지 효소의 구조와 특성을 이해하여 알아보자.

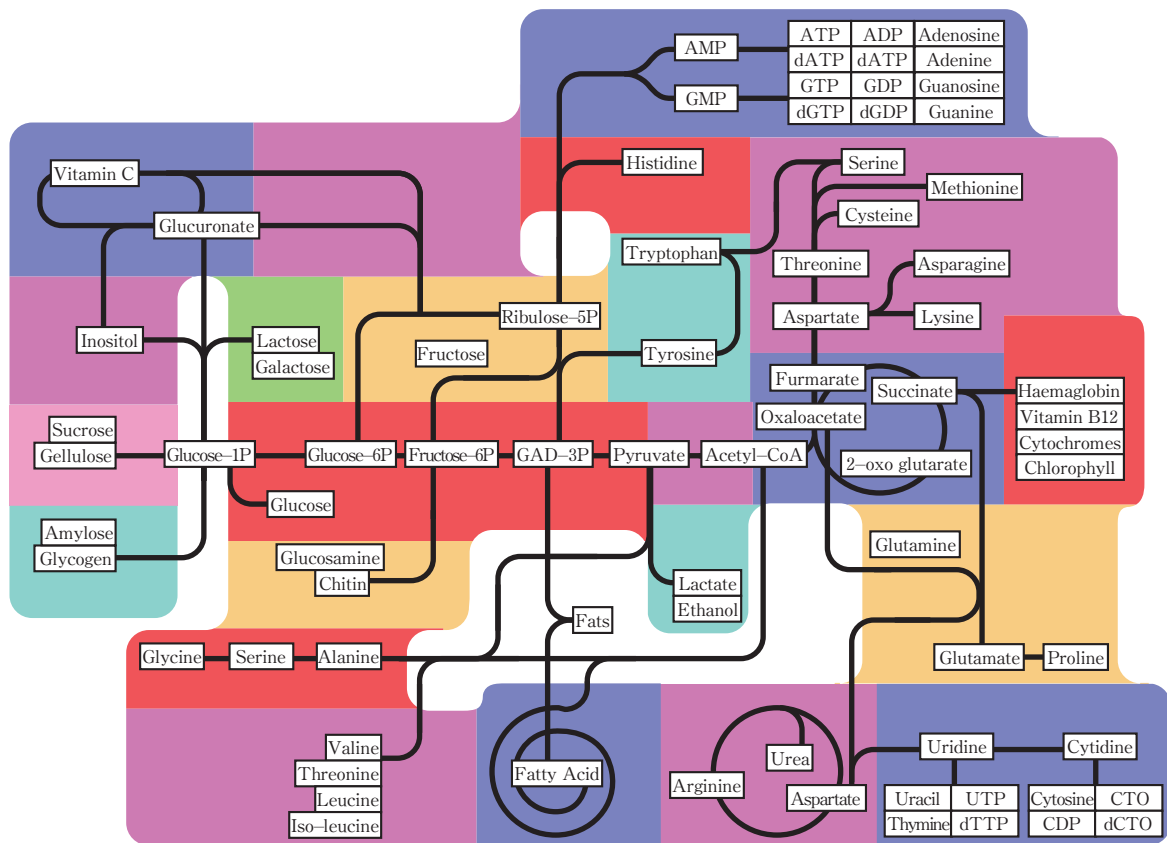
01

물질대사

학·습·목·표

- 물질대사를 이용하여 생명현상을 설명할 수 있다.
- 물질대사의 종류를 알고 특성을 설명할 수 있다.

물질대사는 생물체에서 일어나는 일련의 연결된 화학반응이다. 세포 안에서 일어나는 화학반응 경로는 서로 중복되는 경우가 많으며, 이 경로들은 정교하게 조절된다. 물질대사는 에너지가 투입되는 반응과 에너지가 방출되는 반응으로 나눌 수 있는데, 앞의 반응은 합성반응으로 동화작용에 해당되고 뒤의 반응



〈그림 II-1〉 복잡한 물질대사 회로도

❖ 자유에너지

생물체에서 전체 에너지는 엔탈피(H)이며, 일하는데 사용될 수 있는 에너지는 자유에너지(G)와 사용되지 않는 에너지인 엔트로피(S)를 합한 값이다. 자유에너지의 변화는 반응이 자발적으로 일어나는지를 말해준다.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

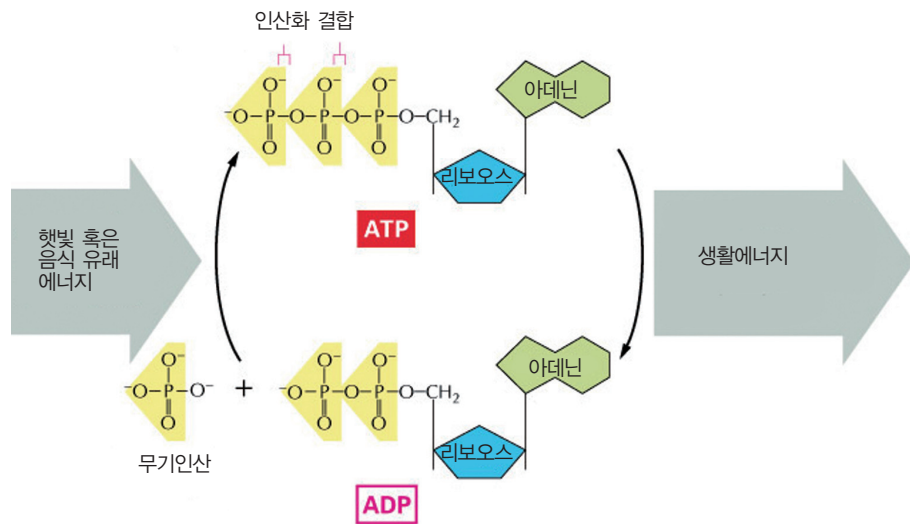
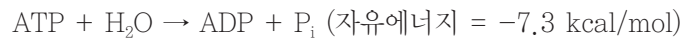
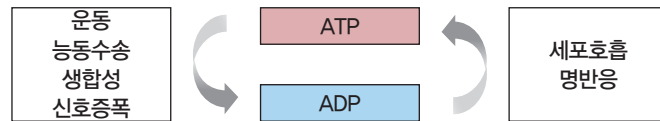
Δ : 변화, T : 절대온도

ΔG 가 음의 값일 때 반응은 자발적으로 일어나며 이화작용에 해당한다.

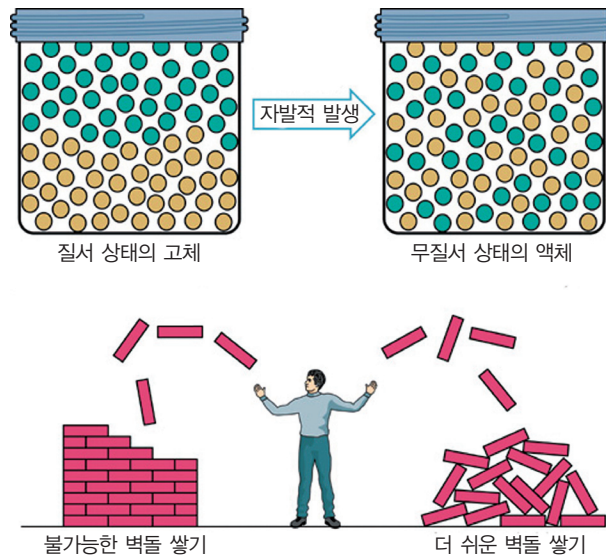
은 분해반응으로 이화작용에 해당된다.

일련의 반응경로는 열역학적으로 불리한 방향으로 진행되는데, 이 때 효소의 역할은 매우 중요하다. 어떤 열역학적으로 불리한 반응의 경우, 이 반응과 짝지어 있는 열역학적으로 더 유리한 반응에 의해 진행될 수 있게 된다.

물질대사에서 사용되는 공통적인 화학분자는 ATP이다. 화학반응에 필요한 에너지는 ATP 형태로 제공되고, 반대로 화학반응에서 생성된 에너지는 ATP의 형태로 저장된다. ATP의 가수분해는 자유에너지가 감소하는 반응으로 ADP로 분해될 때 1몰당 약 7.3 kcal의 에너지가 방출된다. ATP의 분해와 합성 반응은 다른 화학반응에서 에너지를 교환하는데 쓰이며, ATP 자신은 중요한 전자 운반체인 NAD^+ , FAD의 성분으로도 사용된다.



〈그림 II-2〉 ATP와 ADP의 전환



〈그림 II-3〉 열역학 제2법칙

조사하기

열역학 법칙을 조사하고, 열역학 법칙을 이용하여 물질대사를 설명해 보자.

읽을거리 첨단연구

사람의 체온이 36.5°C 인 이유가 밝혀졌다.

미국 아인슈타인대 아르투로 카사데발 교수는 사람의 체온 36.5°C 가 균을 막으면서 온도를 유지할 수 있는 가장 효율적인 구간에 속한다고 미국 미생물학회가 발간하는 '엠비오(mBio)'저널 2010년 11월호에 발표했다.

카사데발 교수는 체온과 질량이 물질대사에 미치는 영향과 온도의 증가에 따라 세균이 감소하는 비율을 기준으로 방정식을 만들었다. 방정식을 분석해 사람이 사용하는 에너지와 세균을 막는데 필요한 온도 사이에서 최적 범위를 찾았다.

적합한 온도는 35.9°C 에서 37.7°C 사이로 나타났다. 이 범위는 세균의 감염을 막으면서 사람이 체온을 유지할 때 사용하는 에너지가 가장 효율적으로 쓰이는 구간이었다. 카사데발 교수는 "방정식에 따르면 최적 온도는 36.7°C 였다"며 "이는 사람의 체온과 비슷하다"고 말했다.

포유류의 높은 체온은 양서류나 파충류에 비해 세균 감염을 막을 수 있는 장점으로 해석됐다. 카사데발 교수는 "이번 연구는 포유류의 체온이 37°C 부근에서 유지되는 이유를 설명하는데 도움을 준다"고 덧붙였다. [동아사이언스]

생각하기

사람의 체온을 유지할 때 사용하는 에너지가 가장 효율적으로 사용되었다고 생각하는 근거가 무엇인지 생각해 보자.

02

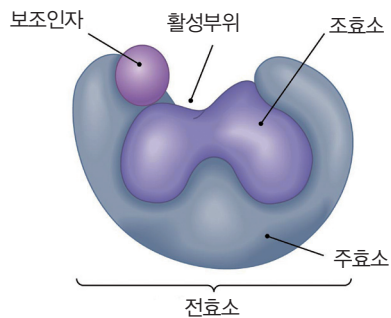
효소

학·습·목·표

- 효소의 구조와 기능을 설명할 수 있다.
- 효소에 의한 반응속도를 계산할 수 있다.
- 효소의 기능을 억제하는 억제물질의 종류와 기능을 이해할 수 있다.

세포가 살아가기 위해서는 물질대사가 신속하고 정확하게 일어나야 한다. 그러기 위해서는 화학반응의 진행을 막는 에너지 장벽을 낮추어야 한다. 에너지 장벽을 낮추기 위한 빠른 방법은 열을 가하는 것이지만 세포에 직접 열을 가할 수는 없다. 이러한 문제를 해결해주는 것이 바로 효소이다.

1) 효소의 구조와 기능



〈그림 II-4〉 효소의 구조

효소는 보통 주성분이 단백질로 반응과정에서 자신은 소모되지 않고 반응속도에 영향을 미치는 유기촉매이다. 단백질이 촉매분자로 사용되는 이유는 매우 다양한 분자들과 특이하게 결합할 수 있기 때문이다. 하지만 많은 효소의 활성화에는 보조인자들이 필요하다. 보조인자에는 금속이온이나 비타민과 같은 작은 유기분자인 조효소들이 포함되는데 효소에 매우 강하게 결합해 있는 경우 보결원자단이라고 부른다.

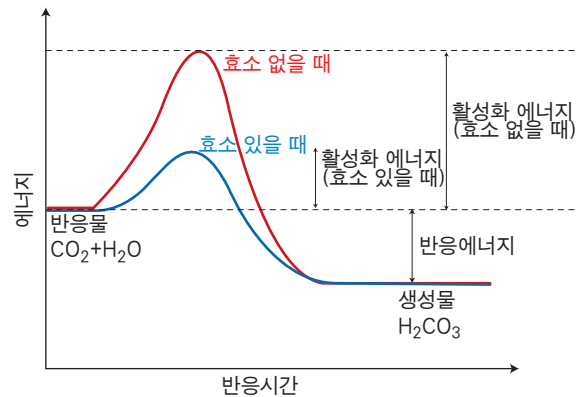
조사하기

단백질만으로 이루어진 효소 종류를 조사하고, 기능에 따른 종류를 조사해 보자.

효소는 활성화 에너지를 감소시켜 반응속도를 빠르게 해줄 뿐 반응물질과 생성물질 사이의 에너지 변화에는 영향을 주지 못한다.

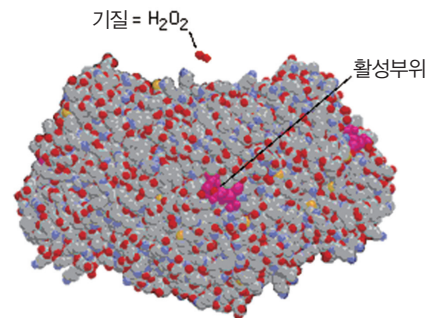
토론하기

효소가 반응물질과 생성물질 사이의 에너지 변화를 일으키지 못하는 이유에 대하여 토론해 보자.



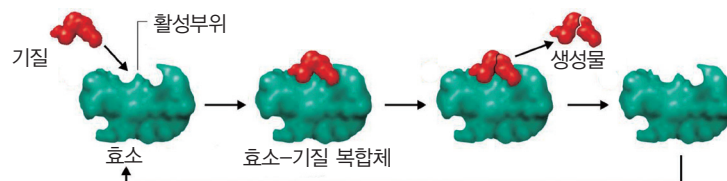
〈그림 II-5〉 효소의 기능

효소는 단백질의 3차 구조로 이루어져 있다. 효소가 작용하는 특정 반응물질을 기질이라고 하며, 기질은 효소의 특정 부위인 활성부위에 결합하게 된다. 활성부위는 주로 효소 표면에 형성된 특정한 모양의 작은 틈으로 이루어져 있으며, 이러한 구조적 특성 때문에 기질 특이성을 가지게 된다. 물론 특이성 정도는 효소마다 다양하다. 예를 들면 고기를 연하게 만들 때 사용되는 파파야 식물에서 추출한 파파인 효소는 특이성이 작아 다양한 펩티드 결합을 자를 수 있지만, 트립신의 경우 리신과 아르기닌의 카르복실기 쪽 결합만을 자른다.



〈그림 II-6〉 카탈라아제의 구조

효소 작용은 많은 약한 결합으로 이루어진 효소-기질 복합체가 형성되면서 시작된다. 이러한 복합체에서 물리화화적인 환경이 만들어지고 반응은 쉽게 진행된다.



〈그림 II-7〉 효소-기질 복합체 형성 과정

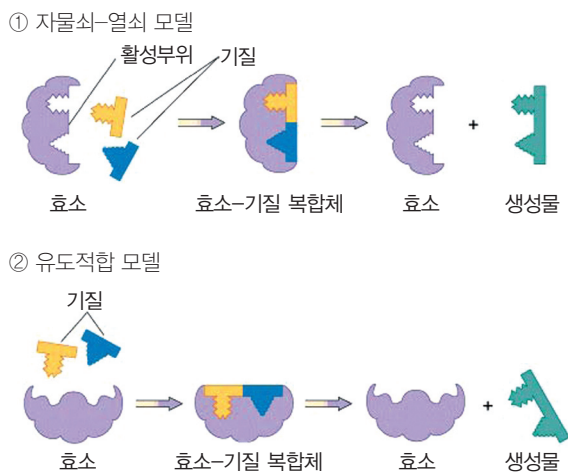
❖ 단백질의 1차 구조
아미노산 서열

❖ 단백질의 2차 구조
폴리펩티드 뼈대의 공간적인 배열을 가리키며, 오른 쪽으로 돌아 올라가는 모양의 알파 나선(α -Helix) 구조와 병풍처럼 접혀진 모양의 베타 면(β -Sheet) 구조가 가장 흔하다.

❖ 단백질의 3차 구조
결사슬을 포함한 전체 폴리펩티드의 3차원적인 구조. 2차 구조의 단위들이 서로 결합하여 만들어진 다. 3차 구조부터 기능이 발현된다.

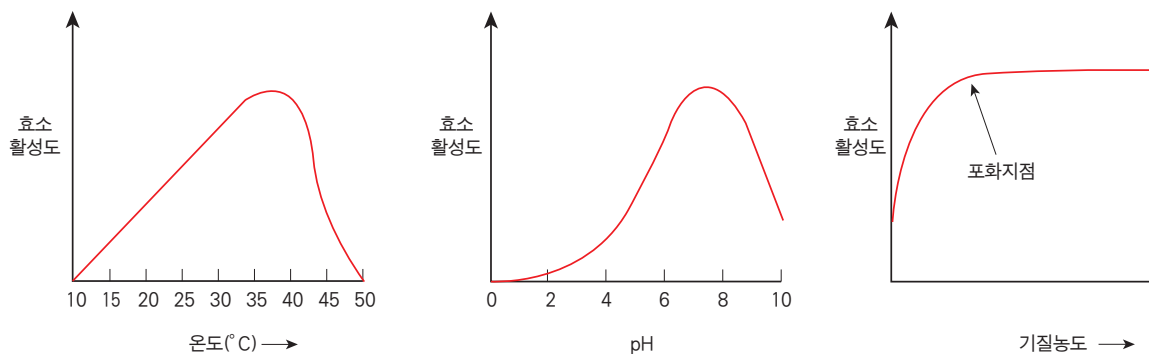
❖ 단백질의 4차 구조
두 개 이상의 폴리펩티드들이 모여서 이루는 복합체로서의 구조. 하나의 폴리펩티드가 단백질로서의 역할을 수행하는 경우 4차 구조를 이루지 않기도 한다.

효소와 기질이 결합하는 방법은 두 가지로 생각해볼 수 있다. 첫째는 자물쇠-열쇠 모형으로 효소의 활성부위의 구조는 기질의 구조와 3차원적인 상보관계에 있다. 둘째는 유도 적합 모형으로 효소가 기질의 일부분과 결합한 후 효소의 활성부위가 기질과 상보적인 구조로 바뀌게 된다. 유도 적합 모형은 효소의 기질에 대한 동적 인식관계를 잘 보여준다.



〈그림 II-8〉 효소-기질 결합 방법

효소의 주성분은 단백질이며, 효소의 기능은 단백질의 3차 구조에 의해 결정되기 때문에 3차 구조에 변화를 주는 물리화학적 환경에 의해 효소의 활성이 달라진다. 이러한 환경에는 온도, pH 등이 포함된다. 온도는 분자운동에 영향을 주는데 높은 온도에서는 효소의 성분인 단백질이 변성되어 효소의 기능이 상실된다. pH의 변화도 단백질의 3차 구조에 변화를 가져온다. 이들 이외에도 기질의 농도 역시 효소의 활성에 영향을 주게 된다.



〈그림 II-9〉 아밀레이즈 활성에 영향을 미치는 요소

조사하기

효소 활성에 영향을 미치는 세 요소 중 기질 농도와 관련된 그래프가 다른 두 요소와 다른 이유를 조사해보자. 그리고 온도에 대한 그래프에서 고온과 저온에서의 효소 구조의 특성에 대해 토론해 보자.

탐구 활동 1

아밀라아제의 최적 온도, 최적 pH 찾기

아밀레이즈는 침과 이자액에 존재하는 소화효소이다. 이 효소는 녹말을 엿당으로 가수분해한다. 실험 활동을 통해 효소와 기질의 관계를 알아보고 주성분이 단백질인 효소의 활성에 영향을 주는 요소를 이해해보자.

(1) 조별 토론을 통해 아밀레이즈의 활성에 온도와 pH가 어떠한 영향으로 주는지 적합한 가설을 설정해 보자.

준비물

- 재료: 10% 녹말, 10% α -아밀레이즈, 엿당, 1M HCl, 1M NaOH, 메탄올, 얼음
- 기구: 1회용 큐벳, 1 mL 오토피펫, 약수저, 유산지, 15 mL 시험관, 알코올램프, 분광광도계, 항온 수조, pH 미터, 전자저울, 제빙기

방법 및 절차

(1) 주어진 재료와 기구를 가지고 조별로 설정한 가설을 검증할 수 있는 실험 장치와 방법을 설계해 보자.

(2) 조별로 탐구 실험을 수행한다.

결과 및 논의

(1) 설계한 실험 방법에서 설정한 각 변인들을 기술해 보자.

(2) 실험을 통해 얻은 결론은 설정한 가설과 어떤 차이를 보이는지 분석해보자.

연구과제

(1) 수행한 실험을 최소한의 장비와 공간, 재료를 가지고 수행할 수 있도록 재설계해 보자.

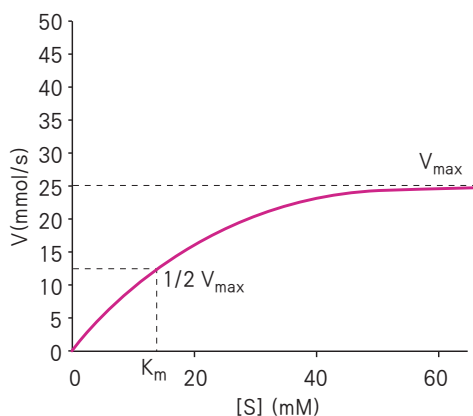
2) 반응속도

효소의 활성은 반응속도로 이해할 수 있다. 반응속도는 단위 시간당 소모된 반응물질의 농도나 생성된 생성물질의 농도로 표현할 수 있다. 반응속도를 연구하는 간단한 방법은 일정한 양의 효소에 여러 농도의 기질을 반응시켜 단위 시간당 생성물질의 농도를 측정하는 것이다. 일반적으로 생성물질의 농도는 시간에 따라 증가하지만 결국에는 생성물질의 농도 혹은 반응물질의 농도 변화가 일어나지 않는 평형상태에 도달하게 된다.

효소 작용의 초기 속도는 미카엘리스-멘텐 식으로 설명할 수 있다.

$$V_0 = V_{\max} \frac{[S]}{[S] + K_m}$$

V_0 : 초기속도 $V_{\max}$: 최대속도
 $[S]$: 기질 농도
 K_m : 반응속도가 $V_{\max}$ 의 1/2일 때
 의 기질 농도 값



〈그림 II-10〉 기질농도에 따른 효소의 반응속도

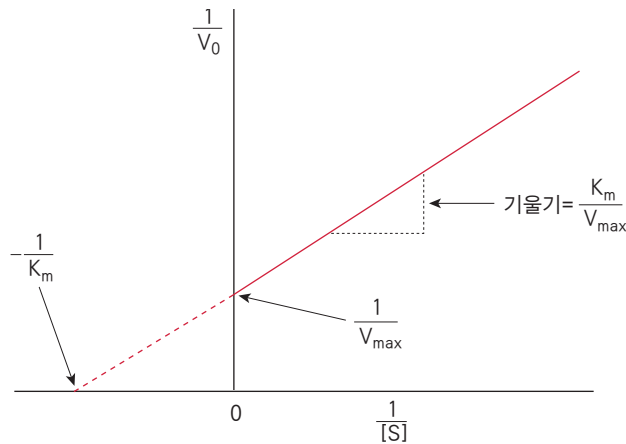
이 식에 따르면 기질 농도가 K_m 보다 매우 작으면 초기속도는 기질 농도에 정비례하고, 반대로 기질 농도가 K_m 보다 매우 크면 초기속도는 최대속도가 된다. 이러한 개념은 일부 사람들에게서 볼 수 있는 에탄올 민감성으로 쉽게 이해할 수 있다. 체내에 들어온 에탄올은 알코올탈수소효소에 의해 아세트알데히드로 산화되고, 이 물질에 의해 얼굴이 붉어지고 심장이 빨리 뛰게 된다.



알코올탈수소효소



아세트알데히드탈수소효소



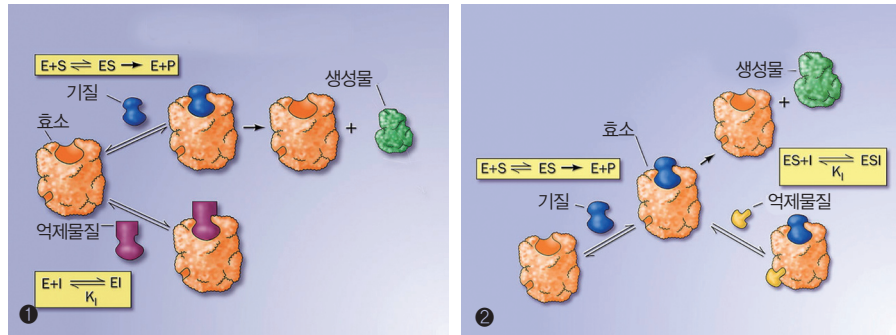
〈그림 II-11〉 '그림 II-10'의 역수 그래프

왜 이러한 민감성에 차이가 있을까? 일반적으로 사람은 두 종류의 아세트알데히드탈수소효소를 가지고 있다. K_m 이 작은 미토콘드리아형과 K_m 이 큰 세포질형 효소인데, 에탄올 감수성이 큰 사람들은 미토콘드리아형 효소를 구성하는 아미노산이 치환되어 활성이 매우 약한 효소를 가지고 있어 주로 세포질형 효소에 의해 아세트알데히드를 분해하게 된다. 세포질형 효소는 K_m 이 커서 에탄올의 분해산물인 아세트알데히드의 분해가 매우 느리고 혈액으로 많이 빠져나와 생리적인 영향을 주게 된다.

3) 억제 작용

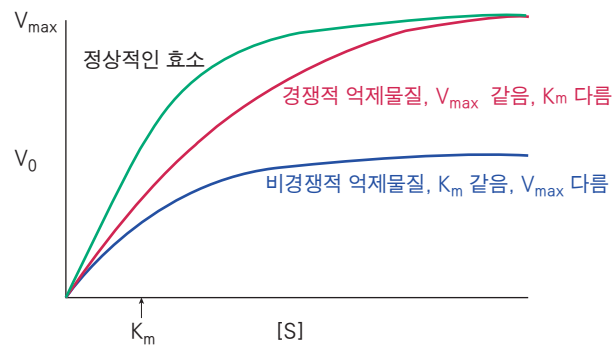
효소들은 여러 물질에 의해 활성이 억제될 수 있다. 생물체 내에서 이러한 억제는 매우 중요한 생리적 조절 방법이 되고 의약품의 일부는 이러한 원리로 사용된다. 특히 다른자리입체성에 의한 효소의 활성 조절은 매우 일반적이다.

효소의 억제 작용은 가역적, 그리고 비가역적으로 나뉜다. 가역적 억제는 효소와 억제물질 사이의 해리가 빠르게 일어나며, 다시 경쟁적 억제와 비경쟁적 억제로 나뉜다. 경쟁적 억제의 경우 기질과 억제물질은 구조가 비슷하고 효소의 활성부위에 대해 자리다툼을 하기 때문에 기질과 효소의 결합 확률을 감소시킨다. 따라서 기질의 농도를 증가시키면 경쟁적 억제물질의 억제효과를 감소시킬 수 있다.



〈그림 II-12〉 효소의 활성 억제 작용. ① 경쟁적 억제 작용, ② 비경쟁적 억제 작용

비경쟁적 억제의 경우, 억제물질과 기질은 효소의 다른 부위에 결합하여 효소의 대사회전수가 감소된다. 기질 농도를 증가시켜도 억제효과가 감소되지 않는다.



〈그림 II-13〉 억제 종류에 따른 효소의 반응속도

조사하기

❖ 대사회전수

효소가 기질로 완전히 포화되었을 때, 한 효소 분자에 의해서 단위 시간당 생성물로 전환되는 기질 분자 수를 의미한다. 효소의 대사회전수는 최대 반응속도 V_{max} 를 전체 효소 농도로 나눈 값이다.

다른자리입체성 조절을 통한 효소의 활성 조절은 물질대사 회로에서 매우 중요하다. 그 이유를 설명하고 이와 관련된 구체적인 사례를 조사해보자.

생명과학과 공학이 만나 펼쳐는 신세계

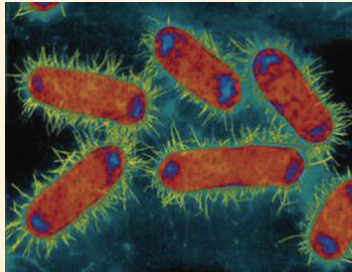
포도당 같은 먹이를 먹고 뱉어 내는 미생물의 대사물질을 이용하기 위해, 인간은 미생물의 어떤 대사회로는 차단하고, 또 증폭하고, 또는 서로 연결함으로써 효율 높은 대사 작용을 하는 새로운 미생물을 탄생시키고 있다.

미생물 공학에 자주 쓰이는 대표 주자는 대장균이다. 대장균은 단세포 생물로 과학자들이 속속들이 가장 잘 아는 미생물이기 때문이다. 우리나라에서도 대장균에서 벌어지는 복잡한 대사와 유전자 조절, 신호전달 네트워크를 조작하고 조절해 새로운 슈퍼 대장균들을 만들어왔다.

미생물 대사회로를 조작해서 에너지원·화합물 등을 생산하도록 하는 것과 같이 어떤 생명체의 대사회로를 인위적으로 조작해 목적을 달성하려는 분야가 대사공학이다. 식물이나 동물에도 적용할 수 있지만 지금은 대부분 미생물에 적용되기 때문에 미생물 대사공학이라고 부른다. 조작된 미생물 균주는 높은 효율로 숙신산, 부탄올, 에탄올을 만들기도 하고 화학적으로 합성하기 어려운 의약품질을 만들기도 한다. 또 자연에는 없는 대사물질을 만들어 대사회로 안에 끼워 넣기도 한다.

자연에 없는 효소 유전자들의 DNA 염기서열을 설계·제작한 뒤 이 인공 유전자를 대장균에 넣어 대장균 몸 안에서 까다롭고 값비싼 화학공정이 저절로 이뤄지게 하는 데 성공했다. 이 연구 성과는 컴퓨터에서 진화하는 ‘가상세포’ 덕분이었다. 일종의 컴퓨터 프로그램인 가상세포는 어떤 생물종의 세포 안에서 이뤄지는 대사와 유전자 조절, 그리고 신호전달 과정을 컴퓨터 알고리즘을 따라 구현해 낸다. 가상세포는 어떤 생물종의 대사 반응이나 유전자 조절 과정을 인위적으로 바꿀 때에 어떤 일이 일어나는지 컴퓨터 화면에 미리 보여주기 때문에, 생명현상을 연구하거나 특정 물질을 고효율로 생산해내는 미생물을 제작할 때 쓰임새 많은 정보를 제공한다고 한다.

예를 들어 대장균의 어떤 대사산물을 얻기 위해서 대장균의 유전자 세 개를 동시에 없애려 한다면, 세 개 유전자 조합을 없애는 실험을 1억6600만 번 되풀이해야 한다. 하지만 고성능 컴퓨터에서 가상세포 프로그램을 돌리면 간단한 시뮬레이션은 1주, 복잡한 것도 6~9주 정도면 끝낼 수 있다. 흔히 젖은 대상을 다루는 생물학 실험 팀을 ‘웨트 팀’이라 부르고, 컴퓨터의 가상세포를 다루는 팀을 ‘드라이 팀’이라고 부른다. 두 집단은 아주 이질적이며 두 집단 사이의 활발한 상호 대화에 의해 연구의 성패가 갈리게 된다. 즉, 융합의 문화가 매우 중요하다.



〈그림 II-14〉 고밀도 알코올분자를 생산하는 유전자조작 대장균

조사하기

컴퓨터를 이용한 모의실험이 과학적으로 실효성을 거두기 위해 사전에 수행해야 하는 것이 무엇인지 조사하고 최근에 첨단 생물학 분야로 등장한 생물정보학에 대해서도 조사해 보자.

정리하기

물질대사

- 생물체는 에너지와 구성 물질을 물질대사로부터 얻는다.
- 물질대사는 생물체에서 일어나는 일련의 연결된 화학반응이다.
- 물질대사에서 사용되는 공통적인 에너지 분자는 ATP이다.
- 물질대사는 크게 동화작용과 이화작용으로 나뉜다.

효소

- 물질대사는 효소에 의해 촉매된다.
- 효소에 의해 활성화 에너지가 감소하지만, 반응에너지는 변화가 없다.
- 효소의 주성분은 단백질이지만 어떤 효소는 활성화되기 위해 단백질 이외의 물질을 필요로 한다.
- 효소는 기질과 효소-기질 복합체를 형성하여 반응이 쉽게 일어날 수 있는 물리화화적인 환경을 조성한다.
- 효소는 입체구조로 인해 특정한 기질과 반응한다.
- 효소의 입체구조는 물리화화적인 환경에 의해 바뀔 수 있다.

1. 다음 제시문은 선천성 대사 이상 질환에 대한 것이다.

선천성 대사 이상 질환은 유전적으로 특정한 효소 결핍으로 인해 생기는 병리학적 결과의 대사성 장애 상태를 말한다. 이 개념은 1902년 Gerrod에 의해 처음으로 도입되었고, 선천성 대사 장애도 질환의 원인이 될 수 있음을 제시하였다.

유전학과 생화학의 발전으로 매년 새로운 선천성 대사 이상증이 발견되어 현재 400여 종의 질환이 알려져 있다. 유전성 대사질환은 태어날 때부터 물질대사가 비정상적인 질환으로 대부분은 인체 중 1개의 효소가 선천적으로 작용할 수 없는 경우이다. 예를 들면, 어느 효소에 이상이 있으면 그 효소에 의해 대사가 이루어져야 할 물질이 그대로 신체에 축적되고 축적물에 독성이 있으면 인체에 기능장애가 나타나게 되는 것이다. 유전성 대사질환은 유전자 이상에 의하여 발생하며, 1개의 효소 이상에서도 여러 종류의 변형이 나타날 수 있는데 그 이유는 효소의 구조나 생성을 지배하는 유전자에 의해 특이한 변이가 나타나기 때문이다. 즉, 이러한 여러 가지 유전성 대사질환에서 다양한 유전적 이질성을 볼 수 있는 이유는 유전학적으로 변이가 다양하기 때문이다. 또한 효소를 구성하는 단백질과 조직을 구성하는 단백질의 기능에 약간의 차이가 생겨서 표현양상도 다양하게 나타나기도 한다. 이같이 대사 이상에 의한 장애 발생 원인은 유해한 물질이 축적되는 경우와 생체에 중요한 물질이 형성되지 못하는 경우로 나누어 볼 수 있다.

선천성 대사 이상 질환을 치료할 수 있는 방법을 제시문의 내용과 관련지어 논술해 보자.

2. 인공적으로 만든 분자로 효소의 기능을 대신하게 하는 것을 인공 효소라고 한다. 최근에 개발된 인공 효소의 종류와 작동원리를 조사하고, 우리 생활에 어떤 변화를 줄지 토론해 보자.