

제 6강 세포 호흡과 효모의 알코올 발효

1. 실험목표

- 1) 효모의 알코올 발효과정을 통해 무기 호흡 과정을 이해한다.
- 2) 효모의 발효에 의하여 당이 에탄올과 이산화탄소로 분해되는 과정을 이해한다.
- 3) 효모가 발효에 이용할 수 있는 기질을 안다.

2. 실험 배경

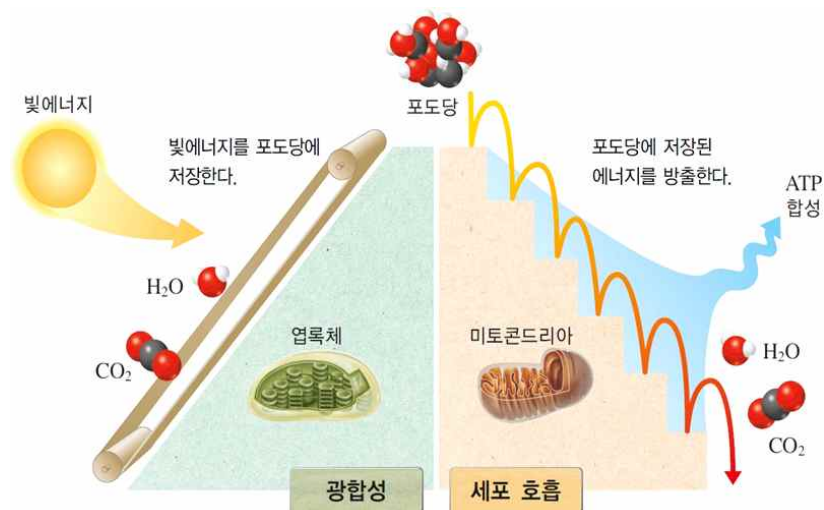
지구상에서 살아가는 생물들은 호흡을 통해 그들이 살아가는 데 필요한 에너지를 얻는다. 호흡은 그 과정에 산소가 사용되는지 여부에 따라 유기호흡과 무기호흡으로 나눌 수 있다. 대부분의 진핵 세포는 일반적으로 유기 호흡을 통해 생활 에너지를 얻고, 산소가 없는 경우에 한해 일시적으로 무기 호흡을 하는 경우가 많다. 그런데 산소가 부족한 환경에 살고 있는 땅 속 식물 뿌리의 공생 세균이나 단세포 균류인 효모, 혐기성 세균 등은 무기 호흡만으로 에너지를 얻어 생활하기도 한다.

이번 실험에는 버섯과 곰팡이가 속한 균류의 일종으로 빵을 부풀게 하고, 술을 빚는 등 우리의 식생활에 큰 도움을 주는 생물인 효모를 사용하여 알코올 발효 실험을 해 봄으로써 생물이 무기호흡을 통해 생물이 에너지를 얻는 과정을 이해해 본다.

3. 생물의 물질대사와 세포 호흡

1) 물질대사

생물체 내에서 생명현상을 유지하기 위해 일어나는 물질의 화학적 변화과정을 물질대사라고 한다. 물질대사에는 간단한 물질로부터 복잡한 물질을 만드는 과정(저분자물질에서 고분자물질을 합성하는 과정)인 동화 작용, 반대로 복잡한 물질을 간단한 물질로 분해하는 과정인 이화 작용이 있다. 동화 과정에는 에너지가 필요하기 때문에 에너지를 흡수하게 되고 대표적인 예로 태양빛으로부터 에너지를 흡수하여 포도당을 합성하는 광합성이 있다. 반대로 포도당으로부터 생명활동에 필요한 에너지를 얻는 세포 호흡의 과정은 이화 작용에 해당한다.



2) 세포 호흡

생물이 생명 활동에 필요한 에너지를 얻기 위하여 세포에서 일어나는 유기물의 산화와 분해 과정을 세포 호흡이라고 하며, 그 과정에 산소가 필요로 하는지 여부에 따라 유기호흡과 무기호흡으로 나뉜다.

❖ 유기 호흡 (유산소 호흡)

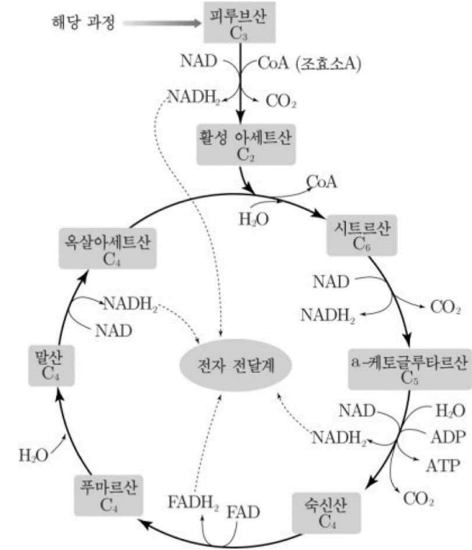
(1) 해당 과정

세포 내에서 호흡 기질이 O_2 에 의해 산화되는 과정은 미토콘드리아 내에서 일어나는데, 세포질로 들어온 포도당은 분자 크기가 커서 미토콘드리아 막을 통과할 수 없다. 따라서 세포질에서는 일단 포도당(C_6)이 2분자의 피루브산(C_3)으로 분해되는데, 이 과정을 당이 분해된다는 의미에서 해당과정이라고 한다. 해당과정에서는 포도당 1분자가 2분자의 피루브산으로 분해되는 동안 2분자의 ATP가 소비되고, 4분자의 ATP가 생성된다. 따라서 해당과정 전체에서는 2분자의 ATP가 얻어진다. 그리고 탈수소효소의 작용으로 포도당에서 이탈된 수소는 NAD라는 조효소를 환원시켜 $2NADH_2$ 가 생성된다.



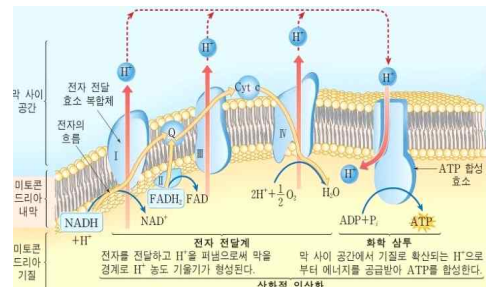
(2) TCA 회로

해당과정에서 생성된 피루브산은 O_2 가 충분히 공급되면 미토콘드리아 막을 통과하여 미토콘드리아의 기질에서 여러 반응 단계를 거쳐 분해되는데, 이 과정을 TCA회로라고 한다. 피루브산은 TCA회로를 거치면서 탈탄산효소와 탈수소효소의 작용으로 CO_2 로 분해되며, 수소를 내놓게 된다. 이렇게 피루브산 1분자가 TCA회로를 거치면서 분해되면 $3CO_2$, $4NADH_2$, $FADH_2$, 그리고 ATP가 생성된다. 이 과정에서 생성된 $NADH_2$ 와 $FADH_2$ 는 전자전달계로 운반되어 일련의 과정을 거쳐 ATP를 추가로 생성하게 되며, TCA회로를 구성하는 각종 유기산들은 각종 물질을 합성하는 원료가 된다.



(3) 전자 전달계

해당과정과 TCA회로에서 생성된 $NADH_2$ 와 $FADH_2$ 가 지니고 있던 전자는 미토콘드리아의 내막에 있는 여러 전자 전달 효소에 차례로 전달되면서 일련의 산화-환원 반응을 진행시키며, 최종적으로 수소이온(H^+)과 함께 O_2 와 결합하여 H_2O 가 된다. 이 경로를 전자전달계라고 하며, 1분자의 $NADH_2$ 와 $FADH_2$ 에서 나온 전자가 전자 전달계를 따라 O_2 로 전달되는 과정에서 각각 3ATP와 2ATP가 합성된다.



포도당 1분자가 세포호흡을 통해 분해되는 동안 해당과정에서 2ATP, TCA회로에서 2ATP, 전자전달계를 통해 34ATP가 생성되어 총 38ATP가 합성되고 이 ATP는 세포 내에서 생명활동에 필요한 에너지를 공급하는 기본 물질로 사용된다.

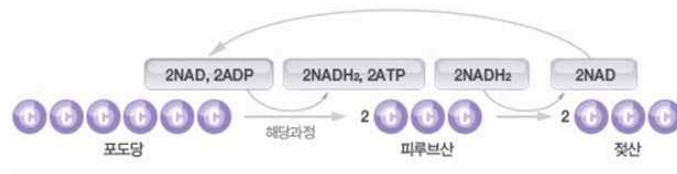
❖ 무기 호흡(무산소 호흡)

무기 호흡은 O_2 를 소비하지 않고 호흡 기질을 산화시켜 에너지(ATP)를 얻는 과정을 말한다. 유기호흡은 다시 발효와 부패가 있는데, 미생물들이 산소를 이용하지 못할 때 산소 대신 자신이 가지고 있는 효소를 이용해 호흡하는 방법이다. 무기호흡을 통해 우리에게 이로운 물질이나 사용 가능한 물질이 얻어지는 경우에는 발효라 부르고, 악취가 나거나 이용할 수 없거나 유해한 물질이 만들어지는 경우에는 흔히 부패라 부른다. 발효에는 젖산발효, 알코올발효, 아세트산발효 등이 있다.

환경에 O_2 가 없을 경우 세포 호흡은 해당 과정까지만 일어나고 중단된다. 그 결과 피루브산과 $NADH_2$ 가 축적되고, $NADH_2$ 는 수소(전자)를 O_2 가 아닌 피루브산 등에 전해주고 NAD 로 회복되어 다시 포도당을 분해하여 ATP를 얻는데 이용된다. 그 결과 알코올 발효에서는 에탄올과 CO_2 가 생성되고, 젖산 발효에서는 젖산이 생성된다.

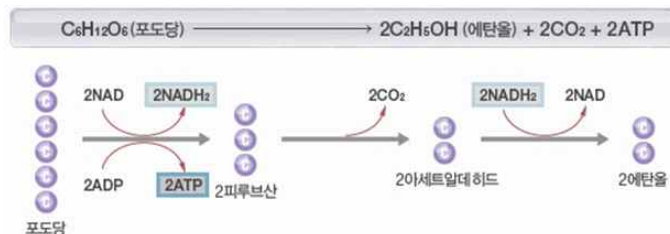
(1) 젖산 발효

젖산균(유산균)을 무산소 상태에서 포도당과 반응시키면 젖산을 만들어내는데, 이러한 발효를 젖산발효라 한다. 요구르트나 치즈, 김치 등이 젖산발효에 의해 만들어지는 음식이다. 젖산발효는 음식을 만드는 과정뿐 아니라 우리 몸 속에서도 일어나는 경우가 있다. 무리하게 달리기를 하게 되면 몸이 빠르게 움직이면서 짧은 시간 동안 많은 에너지를 필요로 하기 때문에 빠르게 산소를 흡수하여 에너지를 보충하기 위해 숨이 가빠지게 된다. 달리는 동안 소모되는 에너지의 양이 산소호흡을 통해 얻어지는 에너지의 양보다 크면 부족한 에너지는 무산소호흡을 통해서라도 얻어야 하는데, 이때 우리 몸 속에서 일어나는 무산소호흡이 바로 젖산발효이다. 젖산발효에 의해 만들어지는 젖산은 우리 몸에 피로를 느끼게 하는 물질이다. 심한 운동을 하고 나서 근육이 피로해지는 이유가 바로 이 때문이다.



(2) 알코올 발효

포도당을 담은 그릇에 효모를 넣고 뚜껑을 닫으면 미생물인 효모가 효소를 이용해 유기물인 포도당을 분해한다. 이때 뚜껑이 덮여 있기 때문에 산소를 통한 호흡이 불가능하며 무산소호흡이 이루어진다. 효모는 포도당을 완전히 분해시키지 못하고 에탄올을 만든다. 이러한 발효를 알코올발효라고 하며 알코올발효를 이용하여 막걸리나 맥주와 같은 술을 만들 수 있다.

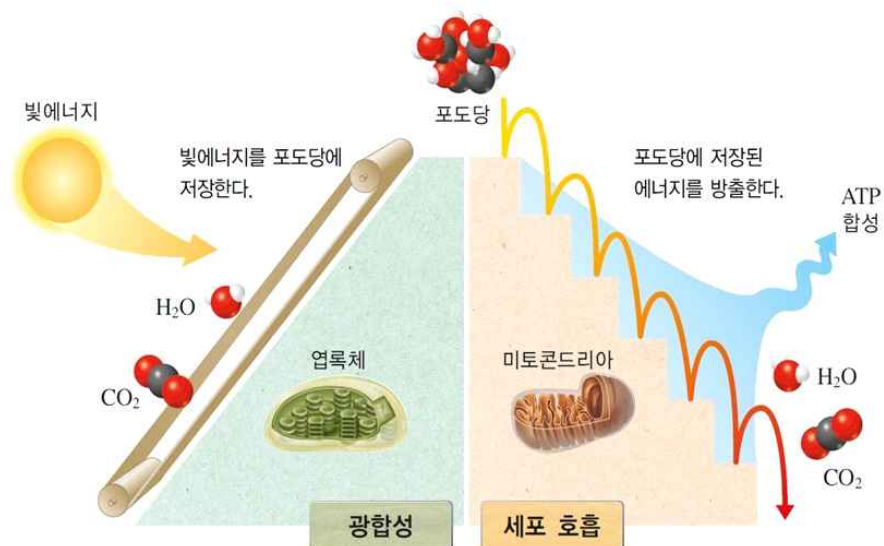


❖ 효모

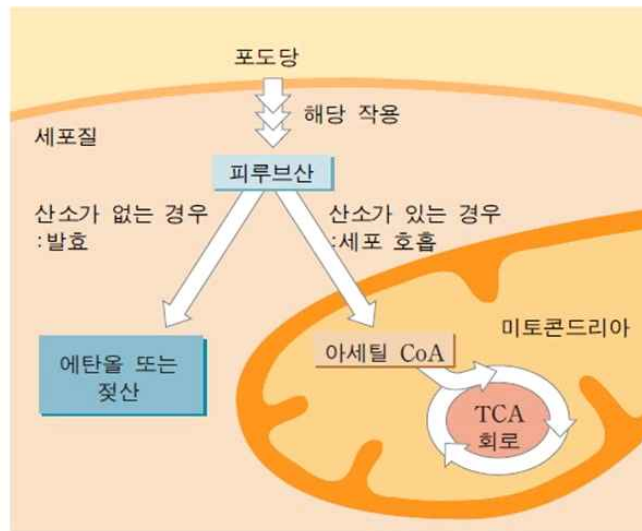
효모는 크기가 3~4마이크로미터 정도인 단세포 생물로, 효모를 사용하여 빵과 술을 만들 수 있다. 효모는 무기 호흡을 하여 산소의 공급 없이도 포도당을 분해하여 에너지를 얻을 수 있는데, 이 과정에서 알코올과 이산화탄소를 배출한다. 이렇게 발생한 탄산가스(기체 상태의 이산화탄소)가 빵 반죽을 부풀게 하기 때문에 제빵 과정에서 많이 사용된다. 효모는 일반적으로 $10^{\circ}C \sim 37^{\circ}C$ 에서 성장할 수 있다. $10^{\circ}C$ 보다 낮은 온도에서는 성장을 멈추고 $37^{\circ}C$ 보다 높은 온도에서는 생장이 억제된다.

세포 호흡과 효모의 알코올 발효

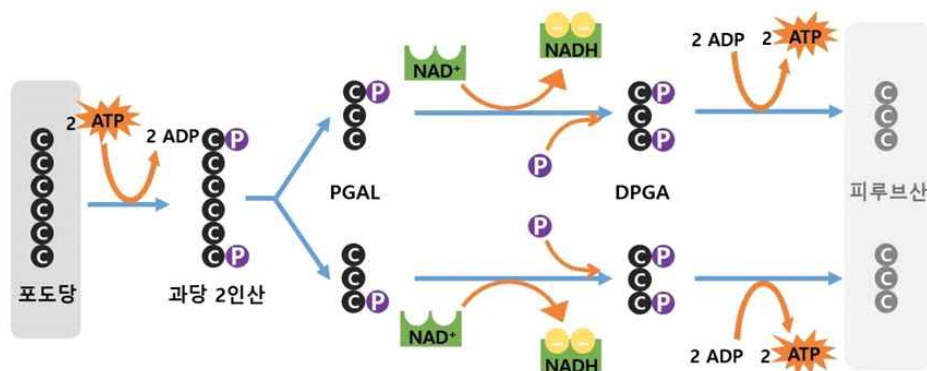
● 물질대사 - 에너지의 전환과 이용



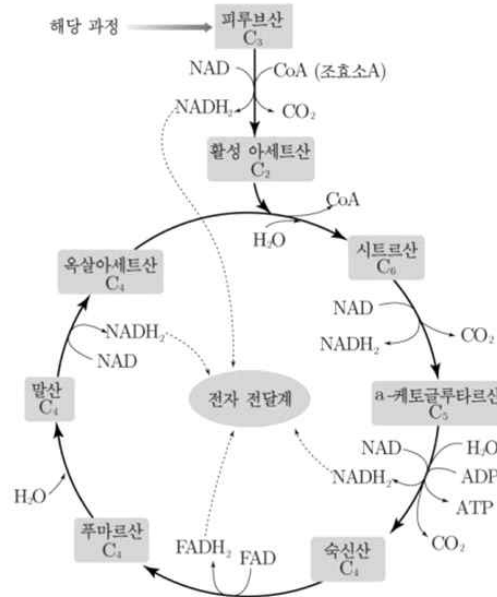
● 세포호흡 - 유기호흡vs무기호흡



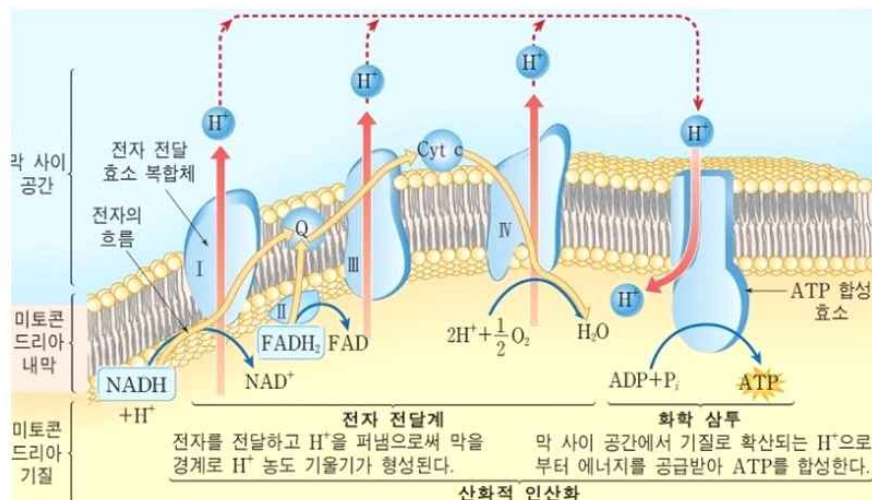
● 세포호흡 - 해당작용 (Glycolysis)



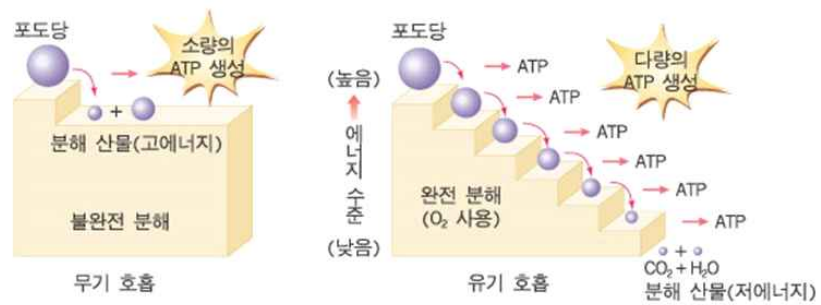
● 세포호흡 - 유기호흡: TCA 회로



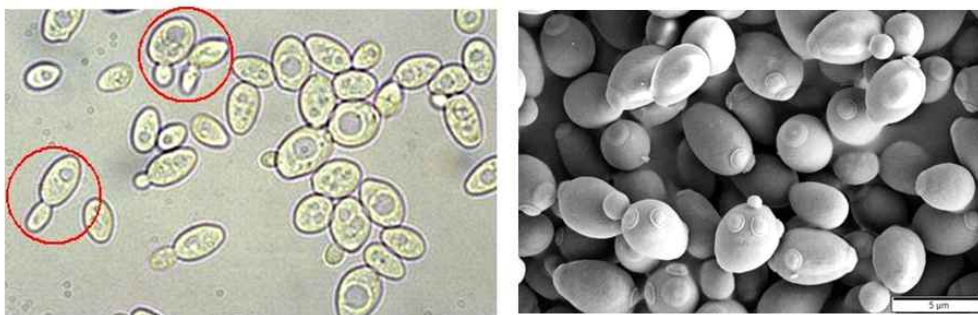
● 세포호흡 - 유기호흡: 전자전달계(산화적인산화)



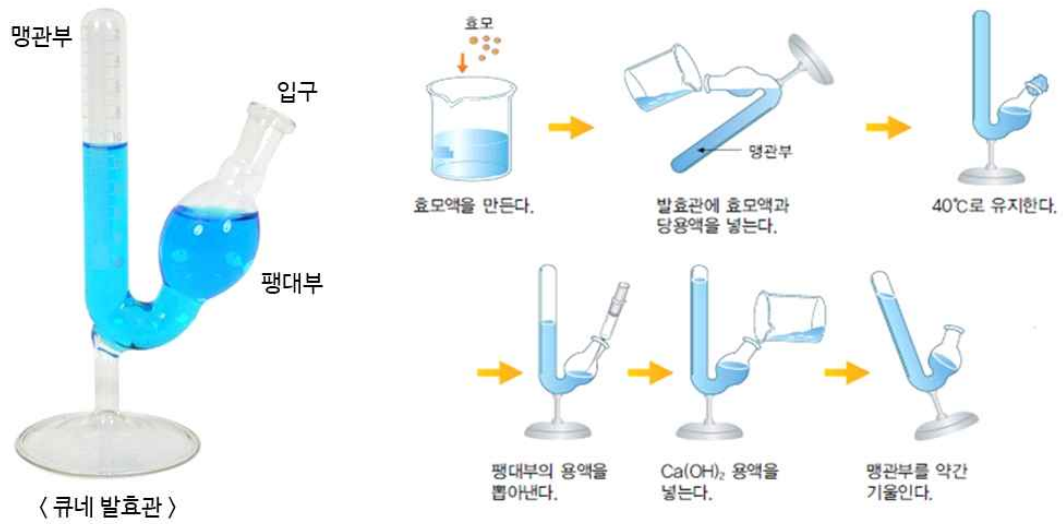
● 세포호흡 - 유기호흡vs무기호흡



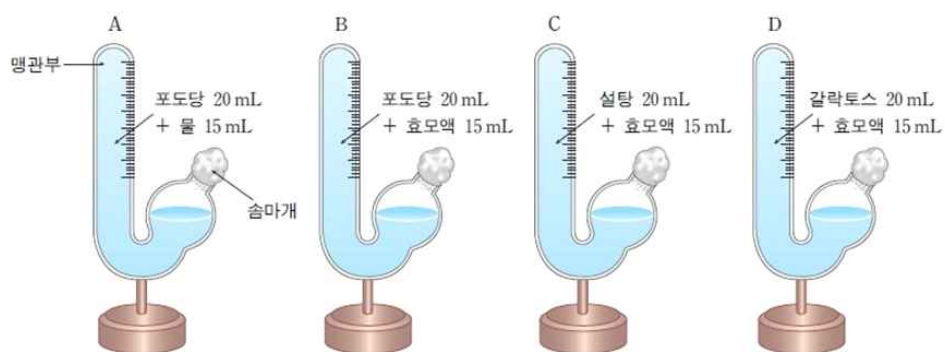
● 효모



● 효모의알코올발효 실험



● 호흡기질에따른 효모의알코올발효 실험



- 호흡기질에 따른 효모의 알코올 발효 실험



- 효모의 알코올 발효 실험



<학생활동지>

효모의 알코올 발효

_____ 년 ____ 월 ____ 일 _____ 반 이름 _____

1. 실험목표

- 1) 효모의 알코올 발효과정을 통해 무기호흡의 과정을 이해한다.
- 2) 효모의 발효에 의하여 당이 에탄올과 이산화탄소로 분해되는 과정을 이해한다.
- 3) 효모가 발효에 이용할 수 있는 기질을 안다.

2. 실험 방법

진핵 세포들은 산소가 없을 때는 일시적으로 무기호흡을 하지만, 대부분은 유기호흡에 의해 생활 에너지를 얻는다. 그러나 식물의 뿌리에 공생하는 세균들이나 단세포 균류인 효모는 계속해서 무기호흡 즉 발효를 할 수 있다. 이처럼 효모는 산소가 없는 상태에서도 포도당을 분해하여 에탄올을 만들고 이 과정에서 생성된 에너지를 얻어 살아간다. 효모의 알코올 발효 실험을 통해 무기호흡의 과정을 이해해보자.

❖ 실험 준비물

- 기구: 큐네 발효관, 비커, 항온기, 스포이트, 증류수, 솜(파라필름),약수저, 유리막대, 시계, 자
- 재료: 즉석 활성 건조 효모, 1M 설탕용액, 설탕, 포도당, 갈락토오스, 40% 석회수($\text{Ca}(\text{OH})_2$ 용액)
 - * 포도당, 갈락토오스 용액의 준비가 어려운 경우 시중에 판매되는 오렌지 주스, 포도 주스, 토마토 주스 등으로 대체하는 것도 고려해 볼 수 있다.
 - * 시중에서 판매하는 효모는 크게 세 종류로 액상 형태의 생효모, 건조 효모(드라이 이스트), 즉석 활성 건조 효모(인스턴트 드라이 이스트)가 있다. 생효모는 판매하는 곳이 적어 구하기 어렵고, 건조 효모는 미리 따뜻한 물에 수 분 동안 1차 발효한 뒤에 사용해야 한다. 즉석 활성 건조 효모는 미리 발효할 필요 없이 반죽에 직접 넣어 사용할 수 있으므로 이를 실험 재료로 사용하는 것이 좋다.

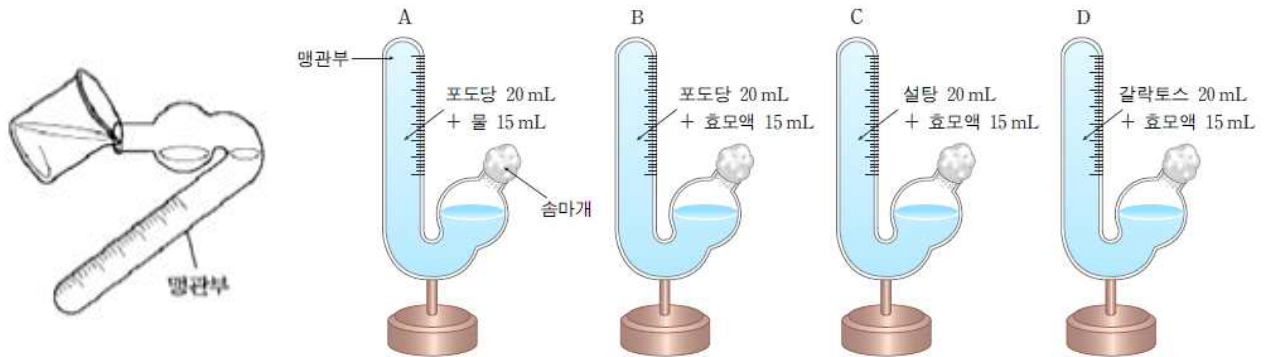
❖ 실험 방법

- ① 14g의 건조효모를 120mL의 증류수에 풀어 효모액을 준비한다.
- ② 4개의 발효관에 각각 1M 설탕용액, 포도당 용액, 갈락토오스 용액 및 증류수 그리고 효모액을 표와 같이 섞어서 잘 흔들어 준다.

<효모의 발효 실험을 위한 발효관 처리>

발효관	처리 방법
A	1M 설탕 용액 20mL + 증류수 15mL
B	1M 설탕 용액 20mL + 효모액 15mL
C	1M 포도당 용액 20mL + 효모액 15mL
D	1M 갈락토오스 용액 20mL + 효모액 15mL

- ③ 맹관부에 기체가 들어가지 않도록 발효관을 세우고 등근 부분의 입구를 솜마개나 파라필름을 사용하여 막은 다음, 항온기에 넣어 40℃로 유지 시킨다.



- ④ 맹관부의 눈금으로 발생하는 기체의 부피를 10분 간격으로 측정하고, 그 기체의 부피 증가량을 계산한다.
- ⑤ 맹관부에 기체가 모이면 스포이트를 사용하여 팽대부의 용액을 가능한 한 많이 뽑아내고, Ca(OH)_2 수용액 15mL를 넣는다. ($\text{CO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$)
- ⑥ 맹관부를 약간 기울여 발생된 기체와 발효관 용액의 접촉면을 넓힌다.
- ⑦ 용액의 냄새를 맡아보고, 어떤 냄새가 나는지 적는다.
- ⑧ 다른 발효관의 실험도 같은 방법으로 실시한다.

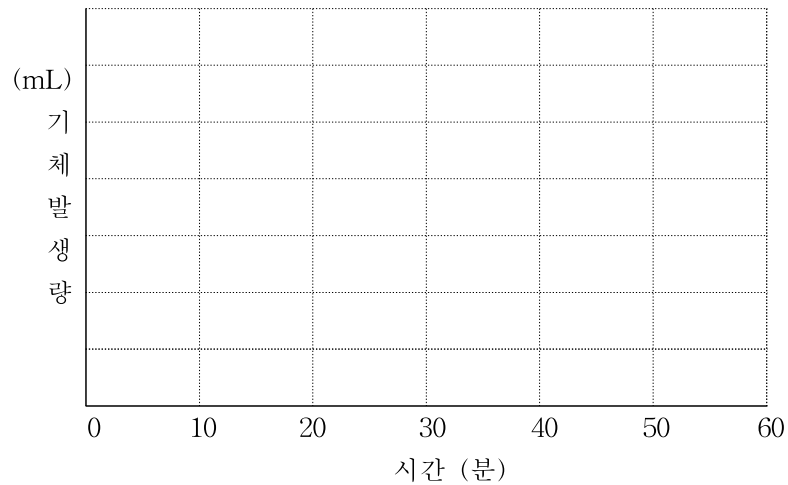
❖ 유의사항

- 설탕, 포도당, 갈락토오스 용액과 효모액이 혼합된 시간을 정확히 기록한다.
- 효모액이나 석회수를 큐네 발효관에 넣을 때 맹관부 안으로 공기가 들어가지 않도록 주의한다.
- 석회수 발효관의 팽대부 속에 조심스럽게 따르고 공기가 들어가지 않도록 한다.

3. 실험 결과

- 1) 기질의 종류 및 시간에 따른 기체 발생량의 변화를 표와 그래프로 나타내어 보자.

시간(분) \ 발효관	0	10	20	30	40	50
A						
B						
C						
D						



2) 어떤 발효관에서 기체가 가장 많이 발생하였는가?

3) 발효가 진행된 용액에서는 어떤 냄새가 나는가?

4. 고찰

1) 발효관에 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 수용액을 넣으면, 맹관부에 모인 기체의 양에는 어떤 변화가 생기는가?
 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 수용액을 넣는 이유는 무엇이며, 맹관부 기체와 이 용액의 접촉면을 크게 하는 이유는 무엇인가?

2) 알코올 발효과정에서 산소가 필요한지 살펴보고 유기호흡의 경우와 다른 점을 비교해보자.

3) 효모의 발효는 어떤 온도에서 가장 활발할지 생각해 보고, 그것을 확인하는 실험을 설계해보자.