



## 6주차 시간의 화살

3교시 시간의 화살과 생명현상

### 열역학 법칙의 지배

이번 시간에는 아래 키워드 중심으로 핵심 내용을 기억하세요.

열역학 제1법칙

열역학 제2법칙

고립계와 열린계

엔트로피

✏ 열 현상은 열역학 법칙의 지배를 받습니다.

열역학 법칙 중 중요한 의미를 가지는 제1법칙과 제2법칙을 살펴봅시다.

### 열역학 제 1 법칙 (에너지 보존 법칙)

"물체의 내부에너지 변화량은 그 물체에 유입된 열에서 물체가 외부에 해준 일을 뺀 것과 같다."

즉,  $\text{내부에너지 변화량} = \text{물체가 얻거나 잃은 열} - \text{물체가 얻거나 외부에 한 일}$

물체의 내부에너지는 열과 일에 의해서 다른 에너지의 형태로 바뀔 뿐이지 소멸되거나 생성되지 않습니다.

열역학 제1법칙은 "( ) 보존 법칙"을 입자가 많은 계에 적용한 것입니다. 자연에 공짜가 없듯이 한 에너지는 다른 에너지로 변화할 수 있지만 고립된 계에서 에너지가 저절로 생겨나거나 소멸되지 않고 항상 일정한 값을 유지합니다.

인체를 하나의 계로 생각해 봅시다. 우리가 음식을 먹으면 에너지(열)를 얻습니다. 반면 피부 등을 통해서 인체는 열을 끊임없이 잃고 있습니다. 이와 같이 **열을 얻으면 내부 에너지를 증가시키고, 반대로 열을 잃으면 내부 에너지는 감소합니다.** 인체가 외부에 **일**을 하면 인체의 내부 에너지는 감소합니다. 반대로 외부에서 일을 얻으면 인체의 내부 에너지는 증가할 것입니다.

#### ※ 참고

- 고립계 = 환경과 계 사이에 열, 입자 등의 교환이 일어나지 않는 계
- 열린계 = 환경과 계 사이에 열, 입자 등의 교환이 자유롭게 일어나는 계

# 1)인체에서 에너지 보존법칙

## ✎ 인체에서 에너지 보존법칙

: 인체에 축적된 에너지는 인체의 자연적인 열손실과 인체가 한일로 변환된다. 인체가 한 일은 인체가 생존해 있기 위해서 필요한 일과 인체가 외부에 하는 일로 나눌 수 있다.

몸에 축적된 에너지 변화 = 열 손실 - 인체가 한 일

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$$

$\Delta U$  = 인체에 저장된 에너지의 변화량

$\Delta Q$  = 인체가 잃거나 얻은 열(heat)

$\Delta W$  = 인체가 한 일

### [일과 열의 부호]

|   | 양의 값(+)      | 음의 값(-)        |
|---|--------------|----------------|
| 열 | 인체가 열을 얻음    | 인체가 열을 잃음      |
| 일 | 인체가 외부에 일을 함 | 인체가 외부에서 일을 받음 |

- **열**은 인체와 주위 환경 사이에 온도 차이가 있을 때 생긴다.
- 주위 환경의 온도가 체온보다 낮으면, 인체는 열을 잃게 되므로 열은 - 값을 가진다.
- 물체에 힘을 가해서 물체의 위치가 변했다면 **일**을 했다고 말한다.
- 엄격하게 말하면, 물체가 움직인 거리(변위)와 물체가 움직인 방향의 힘 성분의 곱을 일로 정의한다.

## 열역학 제 2 법칙 (엔트로피 증가의 법칙)

“열적으로 고립된 계의 엔트로피(entropy)는 결코 감소하지 않는다.”

“어떤 계에서 일정량의 ( ) (heat)을 추출하여 모두 일(work)로 바꿀 수 있는 단일한 열역학 과정은 존재하지 않는다.”  
(켈빈의 열역학 제2법칙 표현)

“낮은 온도의 열저장체에서 높은 온도의 열저장체로 열이 저절로 흘러가는 단일한 열역학 과정은 불가능하다.”  
(클라우지우스의 열역학 제2법칙 표현)

열역학 제2법칙은 물리 현상의 방향성(시간의 화살, *arrow of time*)을 결정합니다. 질서화된 에너지(ordered energy)는 열 에너지(무질서한)로 바뀌기 쉬우나, 그 반대의 과정이 저절로 일어나기는 어렵습니다. 나무가 타면 연기와 재로 변합니다. 질서 있는 나무는 무질서한 상태인 연기와 재로 자연스럽게 변합니다. 그러나 한 번 흩어진 연기와 재는 다시 원래 상태로 되돌아 가지 않습니다.

계가 가질 수 있는 상태의 수를 ( ) (degree of disorder)라 합니다. 고립계에서 무질서도는 절대 감소하지 않습니다. 어떤 계의 총 무질서도를 계의 엔트로피(entropy)라 합니다. 열적으로 고립된 계에서 엔트로피는 항상 증가하거나 변하지 않습니다. 즉, **고립된 계에서** 엔트로피가 감소하는 경우는 일어나지 않습니다.

계가 열려있으면(열린 계란 계와 외부 환경 사이에 열 및 입자의 교환이 일어나는 계를 뜻함) 계의 엔트로피는 감소할 수 있습니다. 그러나 계와 외부 환경을 합한 전체 계의 엔트로피는 여전히 증가하거나 변함이 없습니다. 즉 열린계에서 엔트로피가 감소하면 주위 **환경의 엔트로피**는 더 빨리 증가합니다.



# 엔트로피 증가의 법칙과 시간의 화살

✎ 에너지 보존 법칙이나 에너지 변환율은 변환 과정에서 보존되는 양에 관한 정보만 줄뿐 에너지 변환이 어느 방향으로 일어날 것인지에 대한 정보를 주지 않는다.

예를 들어, 일정한 열이 체내로 들어오면, 그만큼의 화학적 에너지 또는 일이 생성될 것으로 추측할 수 있다. 즉, 따뜻한 난로 앞에 앉아 있으면 저절로 인체에 에너지가 축적되지 않을까?

사실 이런 일은 일어나지 않는다.

- 에너지 변환 과정의 방향을 다루는 물리 법칙을 열역학 제2법칙(또는 엔트로피 증가의 법칙)이라 한다.
- 이 법칙은 어떤 열역학적 과정이 어느 방향으로 자연스럽게 진행될지를 결정한다.

(예를 들면 물컵에 잉크를 한 방울 떨어뜨리면 잉크는 물컵 전체에 골고루 퍼진다. 아무리 기다려도, 저절로 물에 퍼진 잉크가 다시 한 곳에 모이는 일은 없다.)

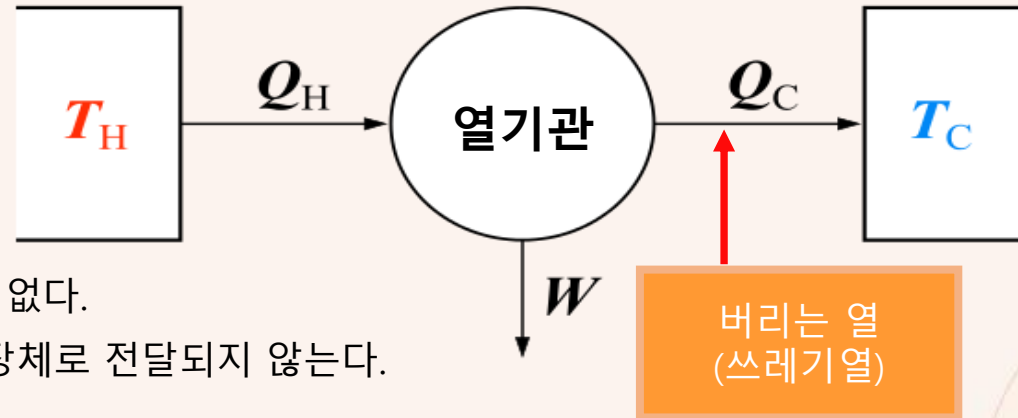
- 물리적 과정에는 **방향성(시간의 화살, arrow of time)**이 존재한다.



# 1. 열역학 법칙

## ※ 열역학 제 2 법칙의 다른 표현들

- 영구기관은 존재하지 않는다.
- 영구냉동기관은 존재하지 않는다.
- ( )이 100%인 열기관은 존재하지 않는다.
- 높은 온도의 열저장체에서 추출한 열을 모두 일로 바꿀 수 없다.
- 낮은 온도의 열저장체에서 열이 저절로 높은 온도의 열저장체로 전달되지 않는다.



열저장체 (열원, 환경) : 보통 계를 둘러싸는 외부 환경이라 생각하면 된다. 엄밀한 의미의 열저장체는 계보다 몹시 커서 계에서 열저장체로 열 또는 입자가 전달되어도 열저장체의 온도와 압력에 변화가 없는 몹시 큰 저장체를 뜻한다.

### 예제 1)

인체는 매우 조직화된(질서 있는) 계이다. 자연에서 생명체가 출현한 것은 열역학 제2법칙에 위배 되는 것이 아닌가?

풀이)

**그렇지 않습니다.**

이러한 주장은 열역학 제2법칙을 잘못 이해한 결과입니다.

인체는 고립된 계가 아닙니다. 인간은 음식을 먹고, 일을 하고 열을 내놓으며 노폐물을 방출합니다. 이와 같이 열과 물질의 출입이 있는 계는 **고립된 계가 아닙니다**. 열려있는 계에서 인체는 보다 질서 있는 상태가 되었지만 **인체를 둘러싸고 있는 환경(지구, 공기)의 엔트로피는 더 많이 증가되었습니다**. 따라서 열역학 제2법칙에 위배됨이 없이 생명체가 출현할 수 있는 것입니다.

사실 지구 자체도 열려있는 계입니다. 지구는 태양으로부터 열과 입자들을 받아들이고, 우주로 열과 입자를 방출하고 있습니다. 따라서 지구에서 진화 과정이 일어나는 것은 오히려 자연스럽습니다.



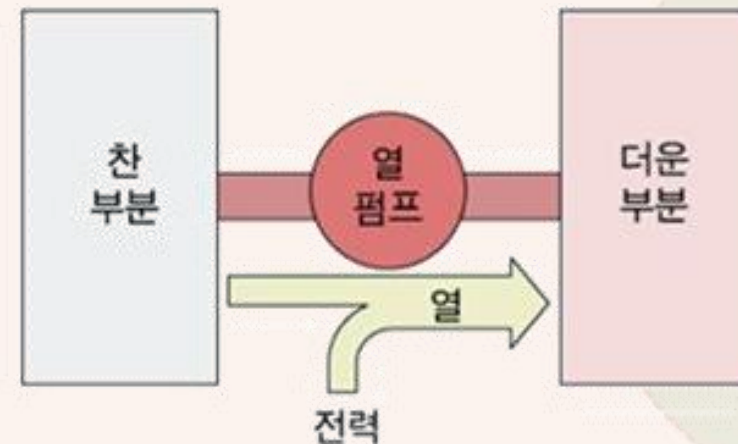
### 예제 1)

에어컨의 원리는 무엇인가?

풀이)

자연스러운 열 흐름은 뜨거운 물체에서 차가운 물체로 열이 흐르는 것입니다. 그러나 에어컨, 냉장고 등은 그림과 같이 차가운 곳에서 열을 바깥쪽으로 이동시킵니다. 열 흐름이 반대이고 더운 바깥 공기로 열을 방출할 때 생성하는 무질서가 차가운 실내 공기를 떠날 때 생성되는 질서보다 낮기 때문에 엔트로피는 감소하여 열역학 제2법칙에 위배되는 것처럼 보입니다. 그러나 여기서 에어컨의 주요 작동 요소 하나를 빠뜨렸다. 실제로 차가운 온도에서 높은 온도로 열을 퍼내기 위해서는 **모터를 돌려서 일을** 해야 합니다. 즉, 전기 에너지에 의한 전력을 고려하여야 합니다. **전력까지 고려하면 에어컨이 작동할 때 전체 ( )는 증가합니다.**

**즉, 열역학 제2법칙을 위배하지 않습니다.** 실제 에어컨의 작동 모식도는 그림과 같습니다. 증발기에서 냉매가 기화되면서 열을 빼앗고, 증발된 기체가 압축기에서 모터의 작동으로 다시 액화되면서 열을 외부로 방출합니다. 이 과정이 순환되면서 실내 온도를 떨어뜨립니다.



### 예제 1)

여름에 냉장고의 문을 열어두면 방안을 시원하게 할 수 있을까?

풀이)

냉장고는 열을 실내로 방출합니다. 냉장고 문을 열어두면 냉장고 내부(방과 통한)의 열을 실내로 퍼내면서 모터에 의한 일이 더해집니다. 따라서 **냉각 순환과정에서 전기 에너지가 더해지므로 방안은 시원해지는 것이 아니라 더워지게 됩니다.** 물론 냉장고 문을 여는 순간에 냉장고 주변은 순간적으로 시원해지지만, 시간이 지나면 실내의 온도는 결국 올라가게 됩니다.



## 2. 영구(기관)은 없다.

열역학 법칙의 의미를 다시 살펴보자.

- 고립계에서 새로운 에너지를 창조할 수 없다. 즉, **고립계의 에너지는 일정하다(열역학 제1법칙)**
- **열기관의 출력은 입력보다 항상 작다.** 출력으로 사용할 수 없는 **쓰레기 열**을 낮은 온도의 환경으로 버려진다. **효율이 가장 좋은 열기관은 카르노 엔진이고, 카르노 엔진의 효율을 항상 1보다 작다.(열역학 제2법칙)**
- 실제 엔진의 효율을 카르노 엔진의 효율보다 작다. (실제 열기관은 비가역적으로 동작한다.)

### 영구기관의 종류

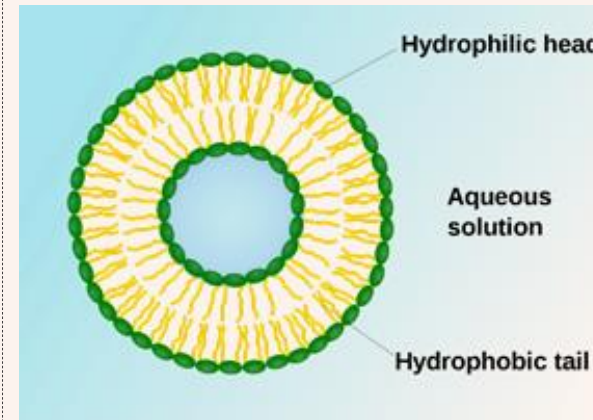
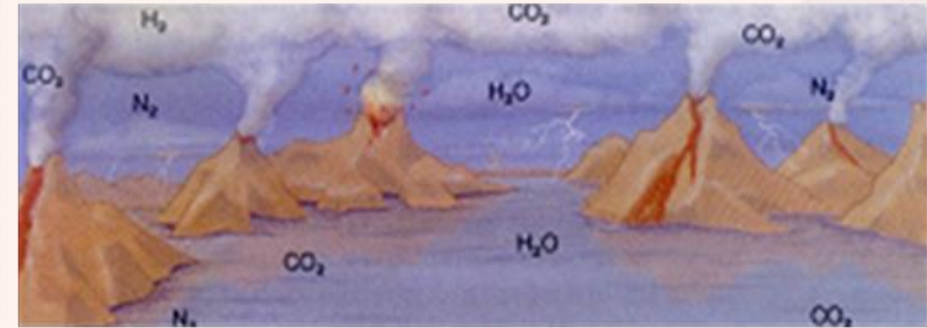
**제1종 영구기관** - 입력 에너지 없이도 일(work)을 생산할 수 있는 기관 → 열역학 제1법칙을 위배하므로 불가능  
- 무에서 유를 창조할 수 없으며, **자연에 공짜는 없다(no free lunch).**

**제2종 영구기관** - 열에너지를 자발적으로 역학적 일로 바꿀 수 있는 기관. 이러한 엔진을 **하나의 열저장체에서 작동**해야 한다. 그러나 열역학 제2법칙에 의하면 열을 유용한 일로 바꾸기 위해서는 높은 온도의 열저장체와 낮은 온도의 열저장체에서 엔진이 동작해야 하며, 높은 온도의 열저장체에서 추출한 열의 일부만 역학적 일로 바뀌며, 나머지 열(쓰레기 열)은 낮은 온도의 열저장체로 흘러간다.

→ 제2종 영구기관은 열역학 제2법칙을 위배하므로 불가능.

✎ 지구는 태양계에서 생명체가 출현할 수는 딱 알맞은 거리의 **골디락스 존(Goldilock's zone)**에 위치함

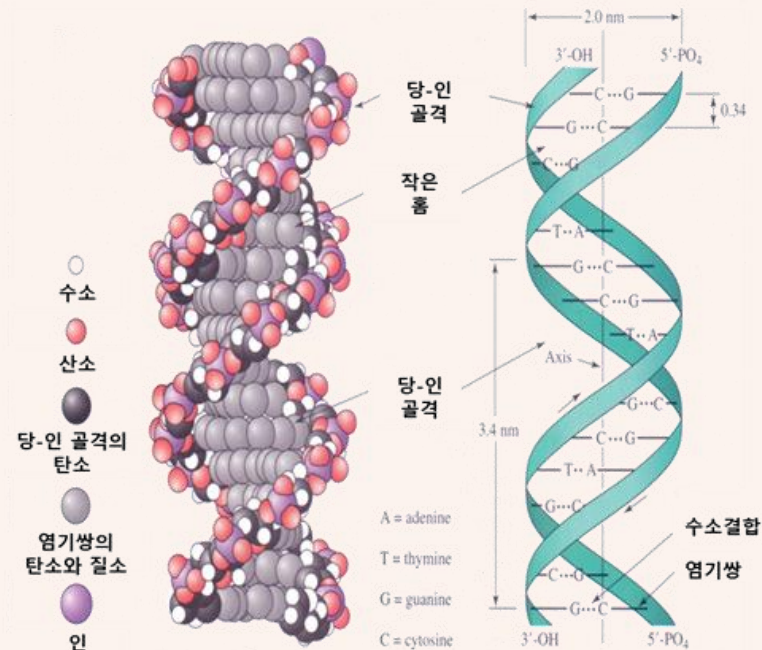
- 지구는 태양으로부터 끊임없이 에너지를 받고 자체적으로 에너지를 우주로 복사하는 ( )(**open system**)이다.
- **열린계(open system)**이는 비평형 상태에서 물질의 구조를 만들어 낼 수 있으며 생명은 **음의 엔트로피(negative entropy)**를 갖는 대표적인 시스템임
- 지구의 초기 대기는 수증기, 질소, 이산화탄소, 소량의 수소, 일산화탄소(CO), 적은 양의 산소가 있었을 것으로 추정됨
- 유기화합물들이 지구에 바다에 축적되어 다양한 유기체 화합물을 포함한 **유기체죽(organic soup)**을 형성
- 친수성(물을 선호함)과 소수성(물을 싫어함)을 동시에 가지고 있는 지질(lipid)들은 **자기조립과정(self-organiztion process)**으로 **공 모양의 세포막(membrane)**을 형성
- **원시세포(protocell)** 출현



리포솜(Liposome)-지질이 물속에서 자기조립화한 구조



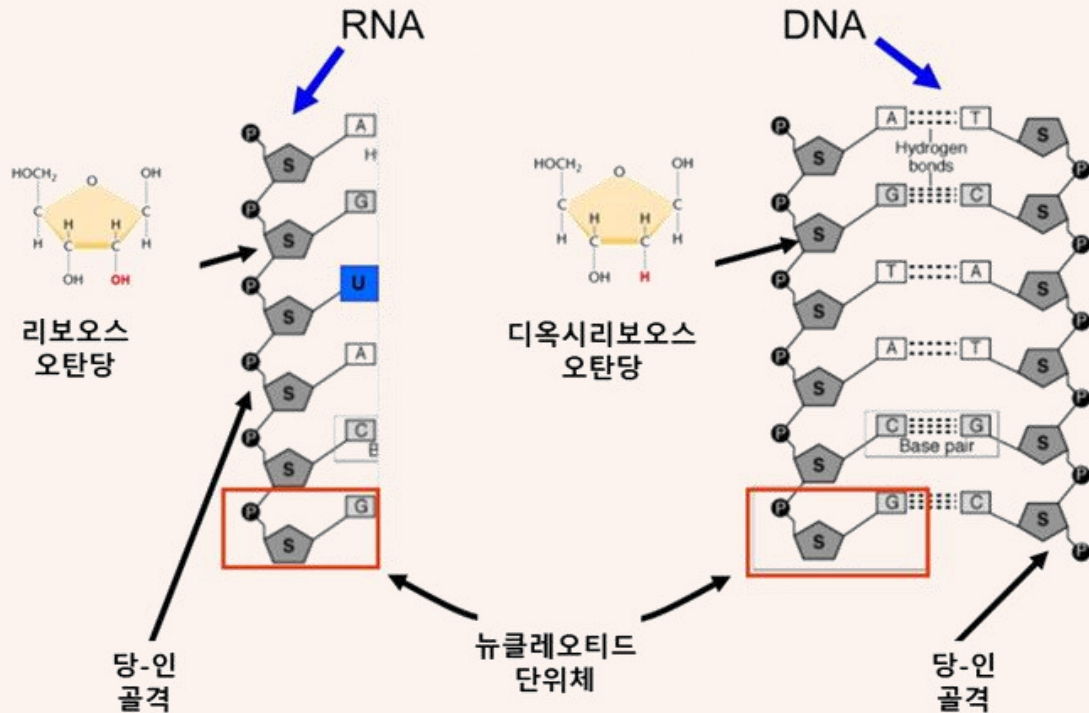
- ✎ 생명체는 자기복제 시스템과 생식 기능을 가지고 있음
- ✎ 원시세포들은 지질-단백질 세포막(lipid-protein membrane)을 가지고 있었으며 에너지 대사작용(metabolism)
- ✎ 인지질(phospholipid)은 물이 있는 환경에 놓이면 물방울 모양의 리포솜(liposome)을 자동으로 형성
- ✎ 효소 역할과 유전물질의 역할을 동시에 수행하는 RNA(ribonucleic acid)가 생명 복제
- ✎ 초기의 원시세포들은 바다에 존재하는 영양분을 섭취하는 유기 종속생명체(heterotroph)로 추정함
- ✎ 세포들은 진화하여 스스로 먹이를 생성하는 독립 영양생명체(autotroph)로 발전



- 생명체들은 자기복제 시스템(self-replication system)을 가짐
- DNA는 이중나선 구조임. 두 가닥의 당(sugar)-인(phosphate) 골격(backbone) 사이에 A-T, G-C 염기쌍이 수소결합으로 연결
- RNA는 아데닌(A, adenine), 구아닌(G, guanine), 시토신(C, cytosine), 우라실(U, uracil) 아미노산이 나선 모양

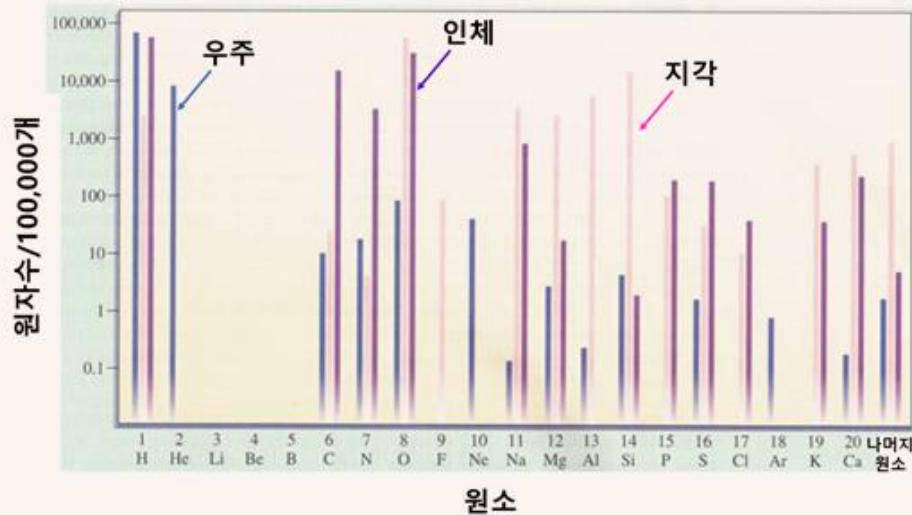


- ✎ DNA는 당-인 골격에 아미노산이 연결된 중합체 구조를 하고 있으며 두 개의 가닥이 쌍을 이루면서 이중나선 모양
- ✎ DNA는 생명체의 **유전암호**를 담고있는 유기고분자



- ✎ **뉴클레오티드(nucleotide)**는 **오탄당(pentose sugar)**-인 (phosphate)-질소 염기(nitrogen base) 기본단위체가 반복된 구조
- ✎ RNA는 **리보오스 오탄당(ribose pentose sugar)**이 기본 단위이고 DNA는 **디옥시리보오스 오탄당(deoxyribose pentose sugar)**이 기본 단위
- ✎ 세포들은 진화하여 스스로 먹이를 생성하는 독립 영양 생명체(autotroph)로 발전
- ✎ DNA 도그마(dogma): DNA 기원설은 DNA → RNA → 단백질의 순서로 생성

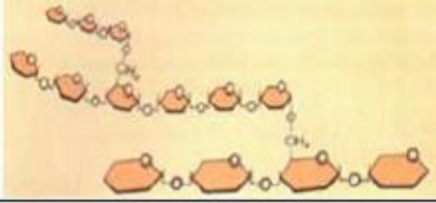
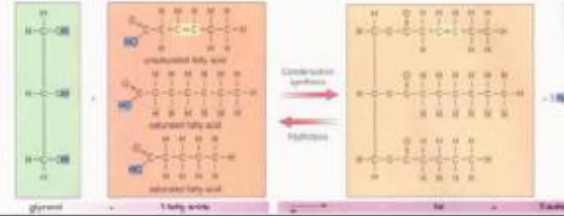
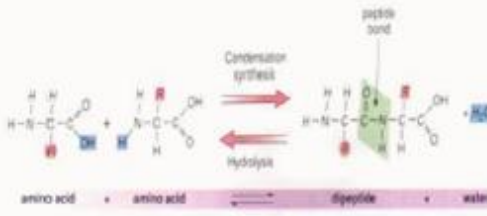
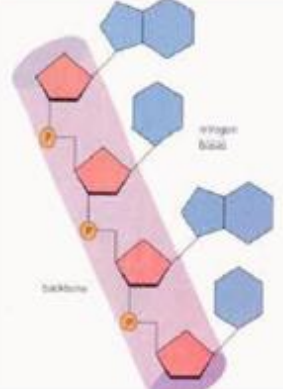
-  생명체를 구성하는 원소는 지각에 풍부한 물질

[illegible]

- 지구의 생명체 구성 원소를 조사해 보면 31개(전체의 28%)의 원소 만을 사용
- 생명에 필요한 원소는 **필수원소**(빨강, 6개), **미량원소**(노랑, 12개), **극미량원소**(보라, 13개)로 분류됨
- 생명 활동에서 4대 생체 고분자인 탄수화물(carbohydrate), 지질(lipid), 단백질(protein), 핵산(nucleic acid)은 필수원소(essential element)인 C, H, N, O, P, S로 구성

# 4대 생체고분자

- ☞ 탄수화물은 육탄당 구조의 **글루코오스(glucose)**들이 산소를 매개로 염주알처럼 연속해서 연결된 구조
- ☞ 녹말은 식물과 동물에서 글루코오스를 저장하는 형태
- ☞ 지질은 인체에서 다양한 기능을 한다. 지질은 인체의 "에너지 저장", "인체의 열손실을 막는 단열제", "주요 장기의 충격 완화" 등의 기능
- ☞ 단백질은 아미노산들이 결합한 폴리펩티드(polypeptide)로 구성
- ☞ 효소(enzyme) 단백질은 생화학 반응을 촉진하는 촉매
- ☞ 케라틴 단백질(keratin protein)은 머리카락이나 손톱을 형성
- ☞ 콜라겐(collagen)은 인대, 관절, 뼈, 힘줄을 연결하는 연결조직이 됨
- ☞ 근육섬유를 형성하는 미오신과 액틴 단백질은 근육의 이완과 수축을 담당
- ☞ 뉴클레오티드(nucleotide)는 세포의 설계도인 DNA를 구성하는 핵심 단위

| 모노머(monomer)                           | 폴리머(polymer)                    | 분자구조  |
|--|---------------------------------|---|
| 단당<br>(monosaccharide)                 | 탄수화물,<br>다당<br>(polysaccharide) |    |
| 글리세롤(glycerol)<br>과<br>지방산(fatty acid) | 지질<br>(lipid)                   |    |
| 아미노산<br>(amino acid)                   | 단백질<br>(protein)                |   |
| 뉴클레오티드<br>(nucleotide)                 | 핵산<br>(nucleic acid)            |  |