



6주차 시간의 화살

1교시 열현상과 산업혁명

시간의 화살

깨진 유리컵은 저절로 다시 원래 컵으로 돌아오지 않습니다.

물에 떨어진 잉크 방울은 한 번 퍼진 후 다시 저절로 원래 모양으로 되돌아 오지 않습니다.

자연에서 발생하는 많은 현상들은 방향성을 가지고 있습니다. 시간이 한 쪽 방향 (시간의 화살, arrow of time)으로 흐르듯이 입자들이 관련된 자연현상에는 방향성이 있습니다.

열역학 법칙은 이러한 자연의 방향성을 잘 설명하고 있습니다.

1. 산업혁명과 열현상

✎ 석탄과 석유가 산업혁명을 불러오다

서양세계는 17세기 과학혁명을 거치고 18세기에 들어서면서 새로운 에너지 혁명을 맞이한다. 18세기에 석탄을 사용한 산업혁명이 일어나고 19세기 말에 석유를 사용하기 시작하면서 인류는 새로운 에너지 시대에 진입한다. 석탄과 석유의 사용은 열기관, 열과학의 발전과 함께 성장하였다.

<표1. 석탄과 석유를 사용한 산업혁명의 주요 사건과 내용>

년도	나라	주요내용
13C	영국	영국 뉴캐슬 지방에서 석탄의 상업적 채굴. 영국 헨리3세는 석탄 채굴권 허가
1712	영국	Newcomen 스팀엔진 개발('광부의 친구'라 불림)
1776	영국	James Watt 최초의 증기기관 최초 설치
1851	미국	키어(Kier)가 케러신(Kerosene)을 램프 등유로 판매(고래기름 대체)
1859	미국	Edwin Drake(석유의 아버지) 펜실바니아 오일크릭에서 드라이브파이프 공법으로 원유채굴 성공. 미국 동부의 오일러시(oil rush) 일으킴
1876	독일	Otto 엔진(가솔린 엔진) 발명
1884	영국	C.A.Parsons가 Steam Turbine 발명
1885	독일	다임러 휘발유 사용 내연기관 발명(폭발기관)

2. 온도

온도 = 입자계에 전달된 에너지의 측정치

두 물체가 열 접촉하고 있을 때 두 물체 사이에 **알짜 에너지 전달**이 없으면 두 물체의 온도는 같다.

온도는 **다체계(many bod system)**에서 정의되는 양으로 대부분의 경우 온도는 입자계의 평균 에너지와 직접적인 관계가 있다.

특히 기체에서 온도는 기체입자의 **평균 ()**에 비례한다.

기체의 온도 = 기체 분자의 평균 운동에너지의 척도

기체인 경우 온도가 높으면 기체 분자의 평균 운동 에너지가 큼니다.

운동에너지는 입자의 속력의 제곱에 비례하므로 **온도가 높으면 속력이 큰 기체 분자가 많아짐**을 의미합니다. 기체계인 경우 어떤 온도에서 기체 분자들의 속력은 일정한 값을 가지는 것이 아니라 **맥스웰-볼츠만 분포**를 따릅니다.

즉, 평균 속력에 해당하는 분자들이 많고, 느리거나 빠른 분자들은 상대적으로 적습니다. 평균 운동에너지란 모든 분자들의 속력의 크기를 더한 다음 분자수로 나눈 값으로 생각하면 됩니다.

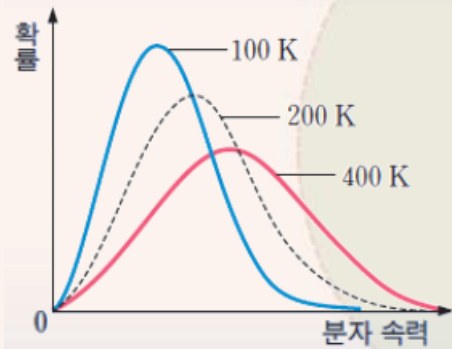
기체가 아닌 경우 물질을 구성하는 원자 또는 분자들은 자유롭게 움직일 수 없습니다.

이 때 물질의 온도는 다음과 같은 의미를 갖습니다.

온도 = 물질을 구성하는 분자(기본 단위)의 평균 역학 에너지의 척도

액체 또는 고체에서 온도는 기본 구성단위의 **평균 역학 에너지**의 크기에 비례합니다.

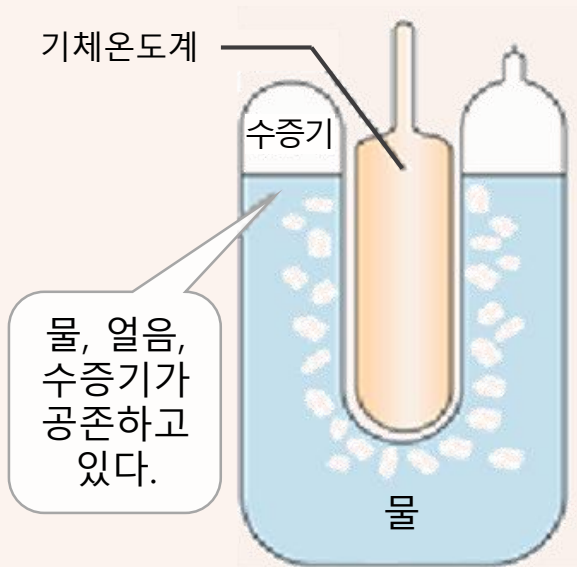
즉, 온도가 높으면 액체 또는 고체를 구성하는 분자의 평균적 역학 에너지가 큼을 의미합니다.



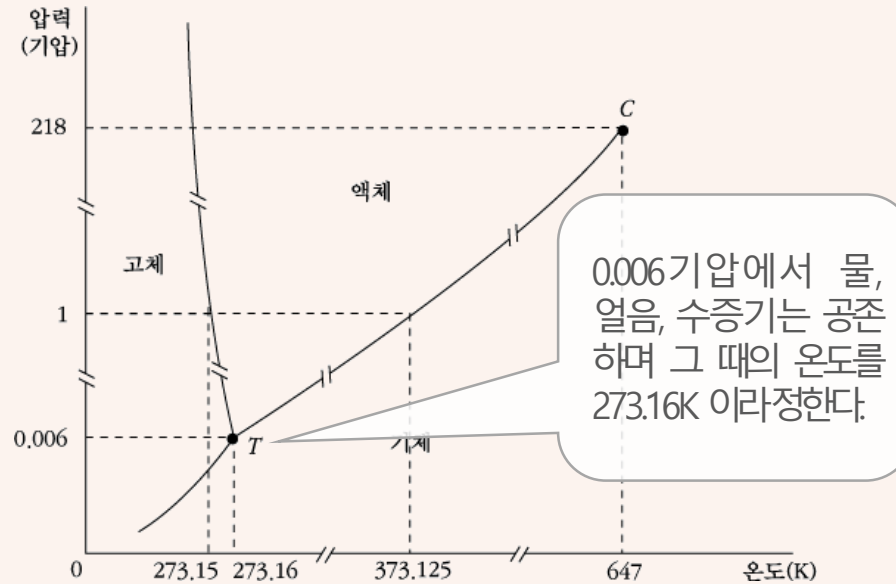
<맥스웰-볼츠만 분포>

3. 표준온도의 정의

- ✎ 표준온도는 다음과 같이 정의합니다. "물의 ()triple point) (그림1과 같이 물, 얼음, 수증기가 공존하는 상태)"에서 온도를 273.16K로 정의합니다. 여기서 **K** 는 켈빈(Kelvin)이라 읽으며 절대온도의 단위입니다.

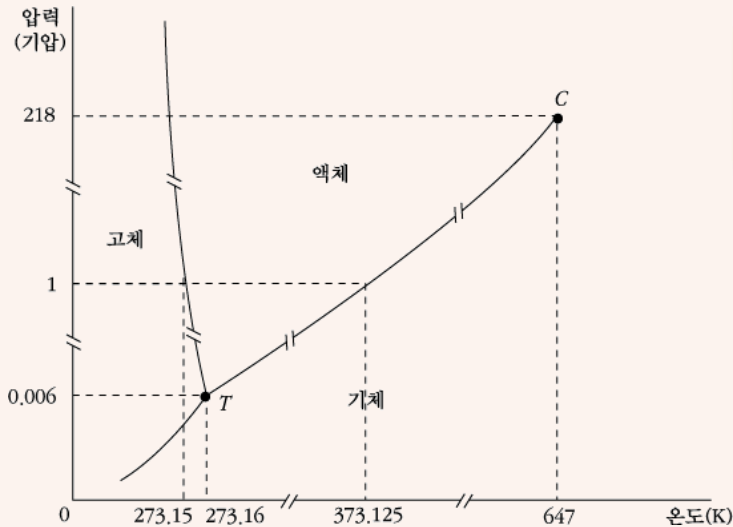


<그림 1: 물이 삼중점에 있는 상태 >



<그림 2 물의 삼중점-T는 물의 삼중점이다.>

4. 표준온도와 온도계



- 물의 삼중점에서 온도 = 273.16 K
- 가장 낮은 절대 온도 = 0 K
- 섭씨 온도와 절대 온도의 관계 $T_c = T - 273.15$

여기서 T는 절대온도입니다. 1기압에서 물의 어는점은 섭씨로 0°C인데 절대온도로 273.15K입니다. 그림2와 같이 물의 삼중점과 물의 어는점은 절대온도로 0.01K의 차이가 있습니다.

우리가 일상적으로 사용하는 섭씨온도계는 1기압에서 물의 어는점의 온도를 0°C, 물의 끓는점의 온도를 100°C로 하여 정한 온도계입니다.

온도변화에 따른 물체의 특성변화를 이용

철 막대의 길이변화, 기체의 부피/압력변화, 도선의 저항변화 등

- ① 물체에 온도계(철막대/기체/도선)를 접촉시킨다.
- ② 온도계와 물체가 열평형을 이룰 때까지 기다린다.
- ③ 온도계의 눈금(길이변화, 부피변화..)을 읽는다.



백금 저항온도계
(측정 가능온도: -260°C ~ 630°C)

5. 온도의 측정방법

✎ 정적 기체온도계

기체의 밀도가 낮고 부피가 일정(정적상태)할 때 보일의 법칙에 의하면 $P/T = \text{일정}$ 입니다.(여기서 P는 압력이고, T는 온도입니다.)

그림3은 정적 기체온도계를 나타냅니다. 기체의 부피는 일정하고 온도가 올라가면 기체의 압력을 측정할 수 있게 되어 있습니다. 이 정적 기체온도계를 사용해서 온도를 측정할 수 있습니다. 온도의 표준점인 삼중점에서 온도는 273.16K이고 압력은 0.006기압입니다.



<그림 3: 정적 기체온도계>

따라서, $P/T = 0.006\text{기압} / 273.16\text{K}$ 입니다. 측정하려는 물체에 정적 기체 온도계를 접촉한 후 압력을 읽으면 온도는 $T = (273.16\text{K}) (P/0.006\text{기압})$ 으로 측정합니다.

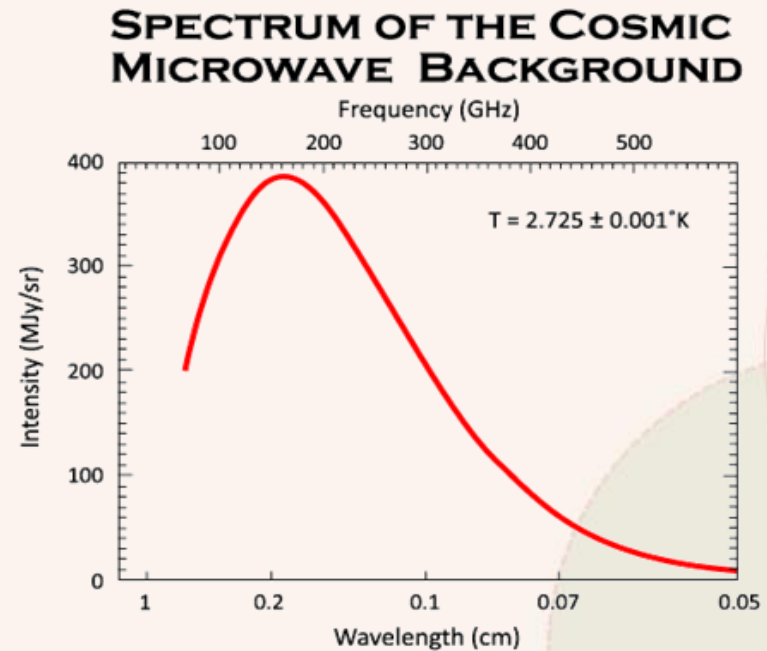
예제 1)

우주의 온도는 얼마인가?

풀이)

온도는 입자들의 평균 에너지에 비례합니다. 우주공간에는 입자들이 없으므로 우주공간에서 온도를 정의하기 힘듭니다.

온도계의 눈금은 우주선의 위치에 따라서 변합니다. 이 때 눈금은 온도계 자체의 온도를 나타냅니다. 우주선이 별에서 멀리 떨어져있으면, 온도계가 흡수하는 열보다 방출하는 에너지가 많으므로 온도계의 눈금은 내려갑니다. 별 근처에 있으면 온도계가 많은 양의 에너지를 흡수하므로 온도계의 눈금은 올라갑니다.

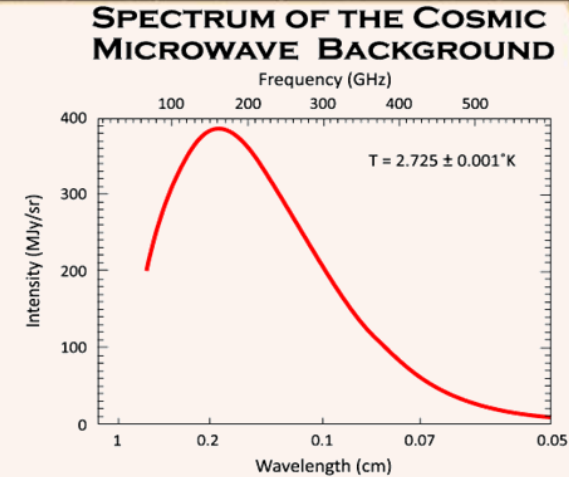
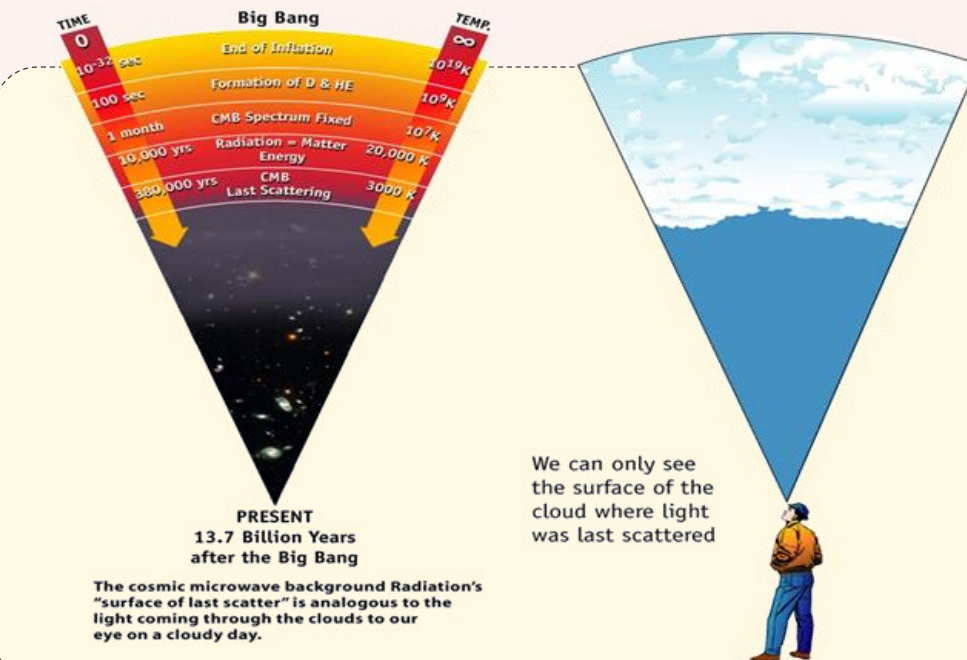


<우주 배경복사 스펙트럼- 이러한 스펙트럼을 주는 온도는 2725K이다>

예제풀이 1

흡수 에너지와 방출 에너지가 같을 때 온도계의 눈금이 최종적인 우주의 온도일 것입니다.

별이 없는 우주에서 온도는 사실 절대영도가 아닙니다. 우주에서 방출되는 전자기파 복사 에너지 때문에 우주는 2.725K 의 배경 복사를 하고 있습니다.



<우주 배경복사 스펙트럼-이러한 스펙트럼을 주는 온도는 2725K이다>

우주배경복사(cosmic microwave background, CMB)는 우연한 기회에 발견되었다. 1964년 전파천문학자인 펜지아스(Arno Penzias)와 윌슨(Robert Wilson)은 라디오파 천문학(radiometer astronomy) 용도로 15미터 크기의 혼안테나(horn antenna)를 이용하여 우주에서 오는 마이크로파를 조사하였다. 이 전파 안테나는 미국의 뉴저지 인근의 벨연구소에 설치되어 있었다. 1964년 5월경에 펜지아스와 윌슨은 안테나로 측정한 신호에서 **라디오파 노이즈(radio noise)**를 관찰하였다. 이 신호의 분포가 그림의 마이크로파 배경복사였다.

예제 2)

절대영도는 어떤 의미인가?

풀이)

온도가 분자들의 불규칙한 운동에 의한 평균 운동에너지에 비례하므로, 절대온도에서 분자들은 운동을 멈출까?

그렇지 않습니다. 절대영도에서 계는 가질 수 있는 에너지의 최소값을 갖습니다. 절대영도를 결정하는 방법 중 하나는 그림과 같이 부피가 일정한 기체의 압력을 온도에 따라 그려서 결정합니다.

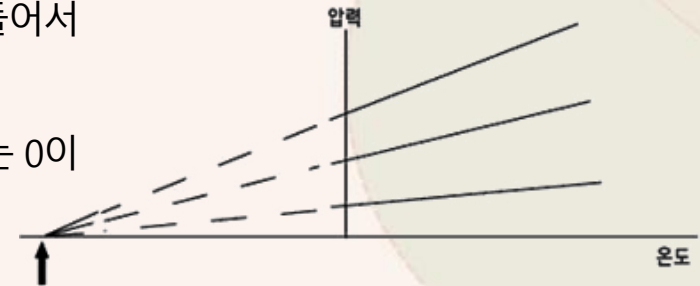
밀도가 매우 작은 기체는 이상기체의 상태 방정식($PV=nRT$)을 만족합니다. 직선은 실험에서 구한 것입니다. 직선을 연장하여 낮은 온도로 연장해 그리면 기체의 종류와 기체의 처음 상태에 상관없이 모든 직선이 한 점에서 만납니다. 음의 온도는 무의미하기 때문에 연장한 직선이 만나는 점이 가장 낮은 온도에 해당하고, 이 온도를 절대영도(absolute zero)라 부릅니다. 그런데 절대온도 $T=0K$ 에서 기체의 압력이 0이어야 합니다.

19세기의 많은 과학자들은 절대영도에서 실제로 0이 되는 것은 기체의 부피라고 생각했습니다.

그러나 부피가 0인 물체는 생각할 수 없으므로 이 생각은 틀린 것입니다. 20세기에 들어서

절대영도에서 실제로 0이 되는 것은 부피가 아니라 계의 ()임을 발견하였습니다.

그러나 하이젠베르크의 "() 원리(13장에서 다름)"에 의하면 절대영도에서 물체의 에너지는 0이 될 수 없고 영점에너지(zero point energy)라 부르는 최소 에너지를 갖게 됩니다.



6. 에너지의 단위

에너지와 일률의 단위

열과 에너지 단위

- 1Kcal = 4184J
- 1cal(칼로리) = 물 1그램을 14.5°C 에서 15.5°C 로 온도 1°C 올리는데 필요한 열
- 1J (줄) = 1N의 힘으로 물체를 1m 이동할 때 한 일

다양한 일률의 단위

일률 = 어떤 시간 동안 한 일 = 일/시간

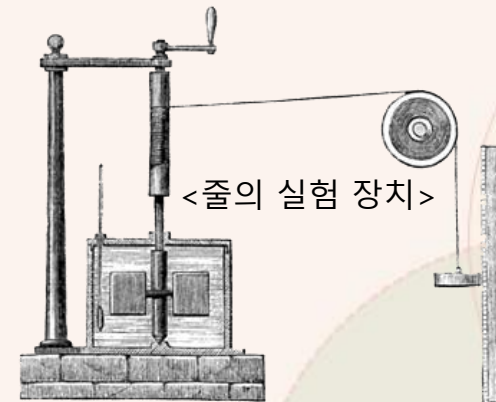
- 생리학자: Kcal/min
- 영양사 : C/day or Kcal/day
- 과학자: 1W = 1J/s

일률의 단위의 관계

- 1Kcal/min=69.7W = 0.094hp
- 100W= 1.43 Kcal/min
- 1hp(마력) = 642Kcal/hr=746W
- 1Kcal/hr=1.162W

$$1\text{met} = 50\text{kcal} / \text{m}^2\text{hr} = 58\text{W} / \text{m}^2$$

1Met = 정상적인 사람이 쉬고 있을 때의 에너지 소비율과 같다.



$$1\text{cal} = 4.184\text{J}$$

1) 포도당의 산화(1)

✎ 인체가 얻는 에너지

: 세포 내에서 포도당의 산화 과정으로 생성

- ✎ 라부아지에(Lavoisier, 1784년) - 음식물의 산화 주장
- ✎ 현대 생물학에서 산화 - 산화는 세포 내에서 일어남
- ✎ 산화 과정에서 발생한 열을 대사 에너지로 사용한다.

• 포도당의 산화 과정

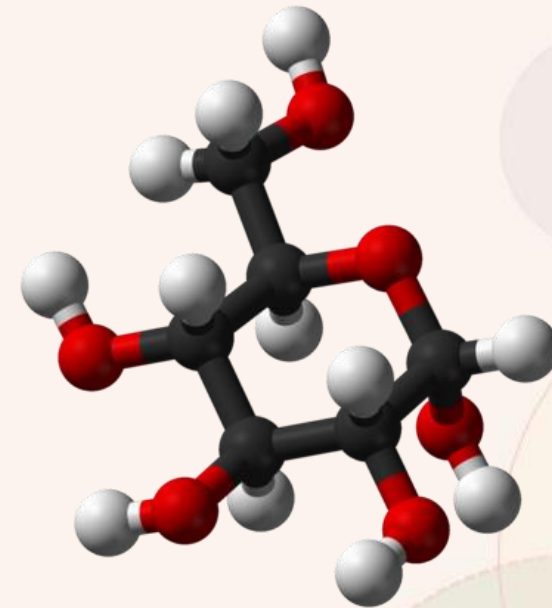


• 포도당 산화 방정식의 의미

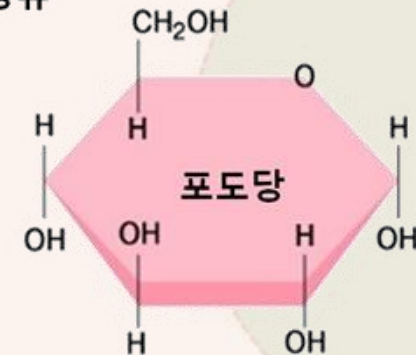
: 포도당 1몰이 산소 6몰과 산화 반응하여 물 6몰, 이산화탄소 6몰 그리고 열 686kcal를 방출한다.

- ✎ 포도당 1g에서 발생하는 에너지 = $686kal(180g) = 3.80kal/g$
- ✎ 연료 1g당 생산되는 이산화탄소의 양 = $686/(22.4 \times 6) = 5.1kal/\ell$
- ✎ 연료 1g당 사용된 산소의 양 = $6 \times 22.4\ell/(180g) = 0.75\ell/g$
- ✎ 산소 1ℓ당 발생하는 에너지 = $6 \times 22.4\ell/(180g) = 0.75\ell/g$

호흡지수(R, respiratory quotient) = 사용된 산소와 생산된 이산화탄소의 몰 비
포도당 산화 반응의 호흡지수는 R=1이다.



단당류



2) 포도당의 산화(2)

유기 호흡에서 1몰의 포도당 분자가 36몰의 ATP를 생성한다. 이 때 6몰의 이산화탄소와 6몰의 물 분자가 생기며 686kcal의 열이 방출된다. 이 열은 세포의 여러 반응에 직접 쓰이지 않고, ATP를 합성하는데 일부 사용된다. 1몰의 ATP를 생성하는데 7.3kcal가 필요하다. 이 유기호흡에서 효율을 구해 보자.



$$\text{효율} = \frac{\text{ATP생성에 사용된 에너지}}{\text{포도당이 산화할 때 방출한 에너지}} \times 100 = \frac{36 \times 7.3kal}{686kal} \times 100 = 38\%$$

→ 세포 호흡의 효율은 약 38%이다.

<1몰의 의미>

화학에서 "표준온도(25°C)와 1기압에서 1몰의 기체는 22.4리터의 부피를 차지한다"라고 배웠지요.

1몰의 간단한 뜻은 어떤 분자가 아보가드로 개수 $N_A = 6.023 \times 10^{23}$ 만큼 있는 것을 뜻합니다.

산소 1몰은 산소 분자가 () 개수만큼 있는 것을 의미합니다. 보통 화학 시간에 배운 원소의 분자량은 그 원소가 1몰 있을 때 질량을 의미합니다. 탄소의 분자량은 12입니다. 즉, 탄소 분자 1몰의 질량은 12g입니다.

지금까지 열현상과 산업혁명에 대해 알아보았습니다.
다음시간에는 열과 열 전달에 대해서 살펴봅시다.