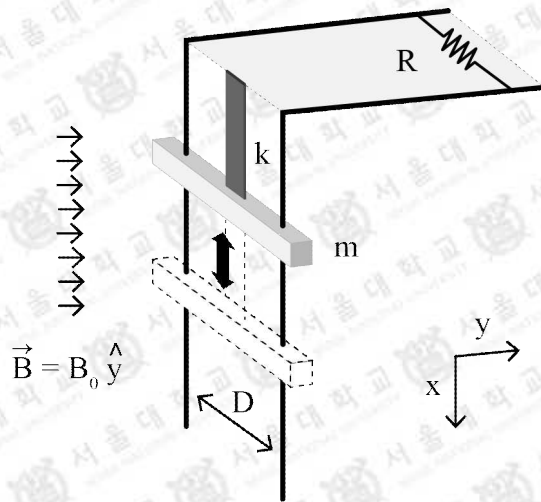


# 물리

제시문

그림과 같이 전기가 통하는 두 레일이 폭  $D$ 로 놓여 있고, 이 두 레일과 항상 접촉한 상태에서 그 위를 질량  $m$ 인 도체 막대가 수직 방향( $x$ 축)으로 마찰 없이 움직일 수 있다. 또한 도체 막대는 용수철 상수(탄성계수)  $k$ 인 고무줄로 연결되어 있고 이 고무줄의 다른 끝은 모서리의 중앙에 고정되어 있다. 두 레일과 도체 막대를 포함하는 평면에는  $+y$ 방향으로 균일한 자기장  $\vec{B} = B_0 \hat{y}$ 이 걸려 있으며, 평행한 두 레일의 끝에는 저항  $R$ 이 연결되어 있다.

(중력과 탄성력이 평형이 되는 위치를  $x = 0$ 이라고 하고 도체 막대가 움직이는 범위는 항상  $|x| < \frac{mg}{k}$ 을 만족한다. 여기서  $g$ 는 중력 가속도이다.)

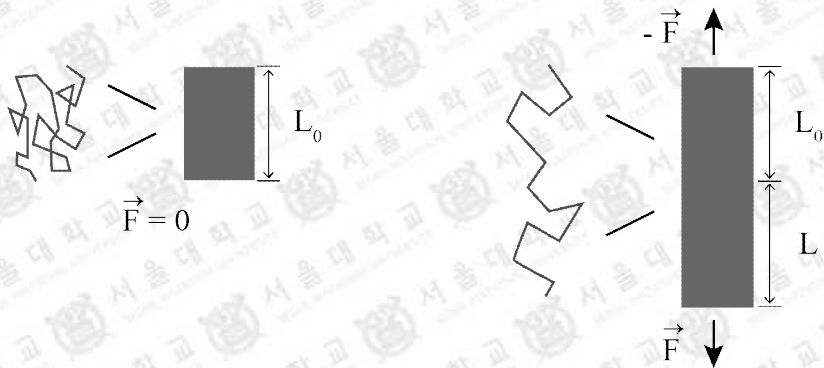


[문제 1] 도체 막대가 어느 순간  $x$ 의 위치에서  $v_x$ 의 속도로 움직일 때, 도체 막대에 작용하는 알짜힘은 다음과 같이 주어짐을 설명하시오.

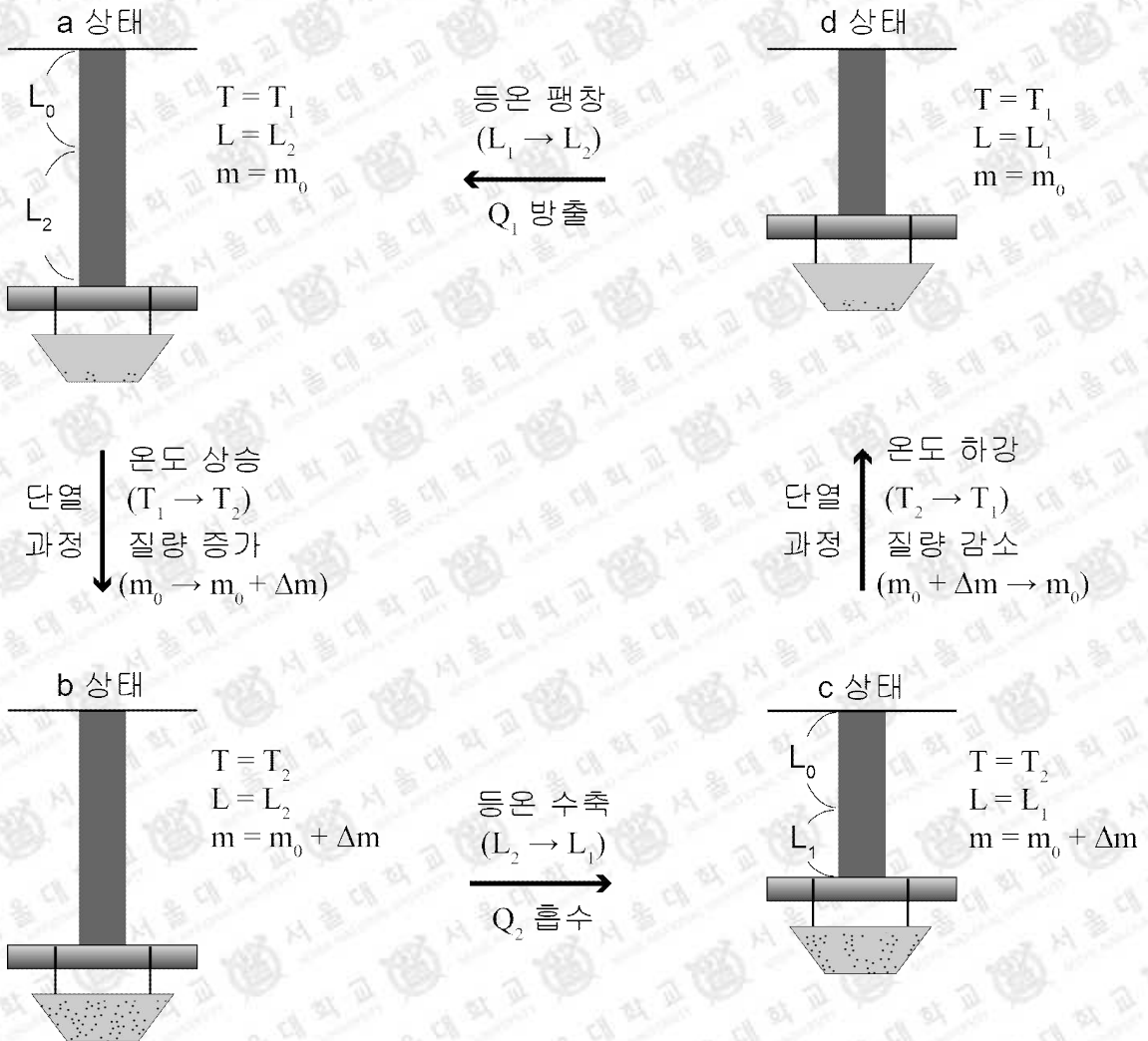
$$F = -kx - bv_x, \quad b = \frac{B_0^2 D^2}{R}$$

[문제 2] 도체 막대를 평형위치에서  $A(0 < A < \frac{mg}{k})$ 만큼 이동시킨 후 놓았을 때 도체 막대가 진동하는 진폭은 시간이 지나며 줄어든다. 이제 위에서 구한  $b$ 가 충분히 작을 때 어느 한 시점에서 진동주기  $\tau$ 동안 도체 막대의 운동을 진폭  $A$ 가 변하지 않는 단진동  $x(t) = A \cos \omega t$ 로 근사할 수 있다. 이 때 총 역학에너지를  $E$ 라고 한다면, 한 주기가 지나는 동안 줄어드는 역학에너지  $\Delta E$ 와 총 역학에너지  $E$ 의 비율  $\frac{\Delta E}{E}$ 는 일정함을 설명하시오.

[문제 3] 고무줄은 여러 가닥의 중합체(polymer) 다발이다. 각 중합체는 상호작용하지 않으며, 하나의 중합체는 아래 그림과 같이 무작위 방향을 갖는 단위체 고리들이 연결된 체인으로 근사하여 생각할 수 있다. 이 모델에 따르면 고무줄의 내부에너지  $U$ 는 고무줄의 늘어난 길이( $L$ )와 온도( $T$ )에 무관( $U(T, L) = U_0$ )하며, 엔트로피  $S$ 는 늘어난 고무줄의 길이  $L$ 만의 함수( $S(T, L) = S(L)$ )가 된다. 열역학 제 1 법칙과, 가역과정의 엔트로피 변화( $\Delta S$ )와 흡수된 열( $Q$ )에 대한 관계식( $\Delta S = \frac{Q}{T}$ )을 이용하여, 고무줄이 가지는 엔트로피를 늘어난 길이  $L$ 의 함수로 구하고, 고무줄의 용수철 상수  $k$ 가 온도에 비례하여 증가함( $k = \alpha T$ )을 보이시오.



[문제 4] 열을 흡수할 때 기체의 부피가 늘어난다는 점을 이용하여 증기기관이 만들어졌다. 열을 흡수할 때 고무줄의 길이가 줄어든다는 사실을 이용하여 아래 그림과 같이 작동하는 고무줄 카르노 기관을 만들어 보자. 도체 막대에는 무게를 조정할 수 있도록 모래 접시를 달아 두었다. 단, 자기장 및 레일은 무시한다.



(a → b 과정에서는 용수철 상수가 늘어나기 때문에 일정한 길이를 유지하기 위해 접시에 모래를 조금씩 올려야 하며, 마찬가지로 이유로 c → d 과정에서는 접시의 모래를 조금씩 떨어내야 한다.)

외부에서 주어진 힘-늘어난 길이( $F-L$ ) 그래프를 a → b → c → d → a 과정에 대해 그리고, 이 열기관의 열효율이  $1 - \frac{T_1}{T_2}$  임을 보이시오. 단, 앞의 모든 과정은 가역적으로 일어난다고 가정하자.

## I 출제 의도 및 근거

### [문제 1] 고무줄이 연결된 도체 막대가 자기장 안에서 이동할 때 받는 힘

유도 기전력(천재교육 물리 II 교과서, II. 2. 3. 전자기 유도, 145쪽)으로 인해 전류가 흐르는 도선이 자기장 속에서 움직이면서 받는 힘(천재교육 물리 II 교과서, II. 2. 2. 자기장 속에서 도선이 받는 힘, 139쪽)과 고무줄로부터 받는 복원력(천재교육 물리 II 교과서, I. 1. 6. 단진동, 51~53쪽)을 결합해서 알짜 힘(천재교육 물리 II 교과서, I. 1. 2. 운동 법칙, 25~27쪽)을 이해할 수 있는지 묻는 문제입니다.

### [문제 2] 고무줄(용수철)이 연결된 도체 막대가 자기장 속에서 단진동을 할 때, 유도 기전력으로 인해 잃어버리는 역학적 에너지

단진동 운동(천재교육 물리 II 교과서, I. 1. 6. 단진동, 51~53쪽)을 이해하고 응용하여 물체가 자기력(천재교육 물리 II 교과서, II. 2. 2. 자기장 속에서 도선이 받는 힘, 138~139쪽)을 받는 상황에서의 역학적 에너지(천재교육 물리 II 교과서, I. 1. 6. 단진동, 55쪽)의 변화를 이해할 수 있는지 묻는 문제입니다.

### [문제 3] 고무줄 용수철 상수의 온도 의존성

열역학 제 1 법칙(천재교육 물리 II 교과서, I. 2. 4. 열역학 제 1 법칙과 열역학 과정, 82~83쪽)과 고무줄의 내부 에너지 및 엔트로피 관계식(천재교육 물리 II 교과서, I. 2. 5. 열역학 제 2 법칙과 엔트로피, 90~93쪽)을 응용하여 고무줄의 용수철 상수가 온도에 비례한다는 것을 이해할 수 있는지 묻는 문제입니다.

### [문제 4] 고무줄 카르노 기관

단열 과정과 등온과정, 두 열역학 과정(천재교육 물리 II 교과서, I. 2. 4. 열역학 제 1 법칙과 열역학 과정, 82~89쪽)과 이를 이용한 이상기체 카르노 기관(천재교육 물리 I 교과서, I. 2. 5. 열역학 법칙, 297~298쪽; 교학사 물리 II 교과서, I. 2. 5. 열역학 과정, 104~108쪽)을 이해하고, 이를 응용하여 제시된 고무줄 카르노 기관을 기술할 수 있는지 묻는 문제입니다.