

[최고의 수험물리 전문가]

윤형철

# 변리사 탄탄물리

[개념+기출]

## — 14장 전자기유도 현상 —

“물리는 외우는 과목이 아니라 생각하는 과목입니다.”

세 가지 강의 철학

목차

— 성장기반 물리

(Grow-based Physics)

— 취사선택 물리

(Cut-off Strategy Physics)

— 생각하는 물리

(Thinking Physics)



물리

윤형철 교수

물리 윤형철 교수입니다.

## 약력

전남과학고등학교 졸업  
서울대학교 사범대학 물리교육과 졸업

전 대치 미래탐구  
전 대치 새움학원  
현 대치 링크물리  
현 변리사스쿨 물리 전문교수

개념 POINT

[전기 개관]

물리현상 (문제상황)	→ 물리량	물리법칙
전기현상	① 전하 ② 전기력 ③ 전기장 ④ 전기 퍼텐셜에너지 ⑤ 전기 퍼텐셜(전위) ⑥ 전기 퍼텐셜차(전위차)	쿨롱의 법칙 가우스 법칙

## I. 전자기유도 현상

개념 POINT

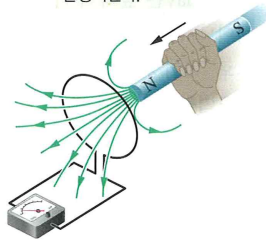
### 어떤 물리현상을 다루는가?

29장에서 배운 전류가 자기장을 만든다는 사실은 당시의 과학자들에게 놀라운 일이었다. 만약 반대로 자기장이 전류를 흐르게 하는 전기장을 만들 수 있다는 것을 발견했다면 훨씬 더 놀랐을 것이다. 이와 같이 자기장과 전기장 사이의 유도관계를 Faraday의 유도법칙이라고 한다.

유도법칙을 발견한 Michael Faraday와 다른 과학자들이 관측한 유도현상은 처음에는 단순한 기초과학이었다. 그러나 오늘날에는 거의 모든 분야에서 유도현상을 응용하고 있다. 예를 들어 초기의 녹음악에 혁명을 일으키고 오늘의 헤비메탈과 핑키를 이끈 전기기타의 토대도 유도현상에서 비롯된다. 도시와 전철에 동력을 공급하는 전기발전기의 기본 작동원리 또한 유도현상이다.

전자기타와 같은 응용에 들어가기 전에 Faraday의 유도법칙에 대한 간단한 두 실험을 살펴보자.

자석의 움직임은 전류고리에 전류를 발생시킨다.



### 두 가지 실험

Faraday의 유도법칙을 논의하기 위한 준비단계로 다음과 같은 두 가지 실험을 생각해 보자.

**첫 번째 실험.** 그림 30-1에는 민감한 전류계에 연결된 전류고리가 있다. 이 회로에는 전지나 다른 기전력장치가 없기 때문에 전류가 흐르지 않는다. 그러

**그림 30-1** 자석이 전류고리에 대해서 상대적으로 움직일 때 전류고리에 전류가 흐르는 것을 전류계로 측정할 수 있다.

나 막대자석을 전류고리 쪽으로 움직이면 회로에 갑자기 전류가 흐르다가 자석의 움직임이 멈추면 사라진다. 한편 자석이 전류고리에서 멀어지면 다시 전류가 흐르게 되는데, 이때 전류는 반대 방향으로 흐른다. 이 실험을 통하여 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

1. 전류고리와 자석 사이에 상대운동이 있을 때에만 전류가 흐르고 상대운동이 멈추면 전류도 사라진다.
2. 운동이 빠를수록 더 큰 전류가 생긴다.
3. 만일 자석의 N극을 전류고리 쪽으로 움직일 때 고리에 시계방향으로 전류가 흐른다면, N극이 고리에서 멀어질 때에는 반시계방향으로 전류가 흐른다. 자석의 S극을 고리에 접근시키거나 멀리할 때도 전류가 흐르지만 전류의 방향은 N극의 경우와는 반대이다.



**그림 30-2** 여닫개 S를 닫거나(오른쪽 전류고리에 전류가 흐를 때) 열면(오른쪽 전류고리의 전류가 꺼질 때) 왼쪽 고리에 전류가 흐르는 것을 전류계로 측정할 수 있다. 이때 전류고리는 움직이지 않는다.

전류고리에 생기는 전류를 **유도전류**라고 하고, 유도전류가 생기도록 단위 전하당 한 일(전류는 전도전자들의 운동이다)을 **유도기전력**이라고 한다. 또한 전류와 기전력이 생기는 과정을 **유도**라고 한다.

**두 번째 실험.** 이 실험에서는 그림 30-2처럼 서로 닿지 않은 채 가까이 있는 두 전류고리를 이용한다. 여닫개 S를 닫아 오른쪽 전류고리에 전류가 흐르게 되면 왼쪽 전류고리에 연결된 전류계에 유도전류가 순간적으로 생긴다. 다음에 여닫개 S를 열어 전류가 흐르지 않게 되면 왼쪽 전류고리에 또 다시 유도전류가 잠깐 생기지만 방향은 반대이다. 유도전류 혹은 유도기전력은 오른쪽 전류고리에 흐르는 전류가 변할 때에만(여닫개를 닫거나 열 때) 생기고, 전류가 일정하면 그 양이 아무리 크더라도 유도전류는 생기지 않는다.

위의 두 실험에서 유도전류와 유도기전력은 어떤 변화가 일어날 때만 생기는 것이 분명하다. 결국 이 변화의 정체를 Faraday가 알아냈다.

## II. 패러데이의 유도법칙

Faraday는 앞의 두 실험처럼 전류고리를 통과하는 자기장의 양을 변화시켜서 전류고리에 기전력이나 전류를 유도할 수 있다는 사실을 발견하였다. 더 나아가서 전류고리를 통과하는 자기장선으로 '자기장의 양'을 시각화할 수 있다는 것도 알아냈다. 위 실험으로부터 알게 된 Faraday의 유도법칙은 다음과 같다.

그림 30-1과 30-2의 왼쪽 전류고리를 통과하는 자기장선의 수가 변할 때 전류고리에 기전력이 유도된다.

유도기전력과 유도전류의 크기는 전류고리를 통과하는 자기장선의 수가 변하는 비율로 결정되며, 전류고리를 통과하는 자기장선의 수와는 무관하다.

위의 첫 번째 실험(그림 30-1 참조)에서 자석의 N극으로부터 자기장선이 퍼져나오므로, 자석의 N극을 전류고리 쪽으로 움직이면 전류고리를 통과하는 자기장선의 수가 증가한다. 이러한 자기장선의 증가는 전류고리 안의 전도전자를 이동시켜서 유도전류를 만들고 전도전자의 운동에 필요한 에너지인 유도기전력을 공급한다. 자석의 움직임을 멈추면 전류고리를 통과하는 자기장선 수는 더 이상 변하지 않기 때문에 유도전류와 유도기전력은 사라진다.

두 번째 실험(그림 30-2 참조)에서는 여닫개가 열렸을 때 전류가 흐르지 않으므로 자기장선이 없다. 그러나 오른쪽 전류고리에 전류가 흐르도록 여닫개를 닫으면 증가하는 전류가 오른쪽 전류고리와 왼쪽 전류고리 주변의 자기장을 동시에 증가시킨다. 자기장이 증가하는 동안 왼쪽 전류고리를 통과하는 자기장선 수가 증가한다. 첫 번째 실험과 같이 전류고리를 통과하는 자기장선의 증가는 명백히 전류고리에 전류와 기전력을 유도한다. 오른쪽 전류고리의 전류가 일정한 값에 도달하면 왼쪽 전류고리를 통과하는 자기장선의 수는 더 이상 변하지 않으므로 유도전류와 유도기전력은 사라진다.

**정량적 방법** Faraday의 법칙을 이용하려면 전류고리를 통과하는 자기장의 양을 계산하는 방법이 필요하다. 23장에서는 비슷한 상황에서 표면을 통과하는 전기장의 양을 계산하기 위해서 전기다발  $\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$ 를 정의하였다. 이제 자기다발을 정의해 보자. 면적  $\vec{A}$ 의 전류고리가 자기장  $\vec{B}$  안에 놓여 있으면 전류고리를 통과하는 자기다발은 다음과 같이 정의한다.

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (\text{면적 } \vec{A} \text{를 통과하는 자기다발}). \quad (30-1)$$

여기서  $d\vec{A}$ 의 방향은 미소면적  $dA$ 에 수직이고 크기가  $dA$ 인 벡터이다.

식 30-1의 특수한 경우로, 전류고리가 평면을 이루고 자기장이 전류고리 면에 수직하면, 식 30-1의 스칼라곱은  $B dA \cos 0^\circ = B dA$ 이다. 또한 자기장이 균일하면  $B$ 를 적분기호 밖으로 빼낼 수 있다. 이때 남게 되는 적분  $\int dA$ 는 바로 전류고리의 면적  $A$ 이다. 따라서 식 30-1은 다음과 같이 간단하게 정리된다.

$$\Phi_B = BA \quad (\vec{B} \text{가 균일하며 } \vec{A} \text{에 수직할 때}). \quad (30-2)$$

식 30-1과 30-2로부터 자기다발에 대한 SI 단위는  $T \cdot m^2$ 임을 알 수 있고, 이것을 웨버(약자로 Wb)라고 한다.

$$1 \text{ 웨버} = 1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot m^2. \quad (30-3)$$

자기다발을 이용하여 Faraday의 법칙을 다음과 같이 설명할 수 있다.

전류고리에 유도되는 기전력  $\mathcal{E}$ 의 크기는 전류고리를 통과하는 자기다발  $\Phi_B$ 의 시간변화율과 같다.

다음 절에서 보겠지만 유도기전력  $\mathcal{E}$ 는 자기다발의 변화를 반대하는 방향으로 생긴다. 따라서 Faraday의 법칙은 다음과 같이 반대를 뜻하는 음의 부호와 함께 표기한다.

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{Faraday의 법칙}). \quad (30-4)$$

유도기전력의 크기를 구할 때는 식 30-4의 음의 부호를 무시하기도 한다.

감은 수가  $N$ 인 줄고리를 통과하는 자기다발을 변화시키면 유도기전력이 모든 고리에 생기므로 줄고리의 전체 유도기전력은 각각의 고리에 생기는 유도기전력의 합과 같다. 만일 고리를 촘촘히 감아서 각각의 고리를 통과하는 자기다발이 같다면 전체 유도기전력은 다음과 같다.

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (N\text{번 감은 줄고리}). \quad (30-5)$$

다음은 고리를 통과하는 자기다발을 변화시킬 수 있는 일반적인 방법들이다.

1. 고리를 통과하는 자기장  $B$ 의 크기를 변화시킨다.
2. 고리의 전체 면적을 변화시키거나, 자기장이 걸려 있는 곳에 놓인 면적의 크기를 변화시킨다. 예컨대 고리를 크게 만들거나 고리를 자기장을 향하여 접근시키거나 멀어지게 하는 방법 등이다.
3. 자기장  $\vec{B}$ 의 방향과 고리의 단면이 이루는 각도를 바꾼다. 예를 들면 고리를 회전하는 경우인데 자기장  $\vec{B}$ 와 고리의 단면이 처음에 서로 수직이라면  $90^\circ$  회전 후에는 평행이 된다.

개념 POINT

### III. 렌츠의 법칙

#### 개념 POINT

Faraday가 유도법칙을 제안한 후 곧이어 Heinrich Friedrich Lenz는 전류고리에 유도되는 전류의 방향을 결정하는 Lenz의 법칙으로 알려진 다음과 같은 규칙을 제안하였다.

전류고리에 유도되는 전류는 자기다발의 변화를 방해하는 방향으로 흐른다.

다시 말하면 유도기전력의 방향이 유도전류의 방향이다. Lenz의 법칙에 익숙해지기 위해서 그림 30-4와 같은 두 가지 방법으로 Lenz의 법칙을 적용해 보자. 여기서는 자석의 N극이 전류고리를 향하여 움직인다.

1. 자석의 운동을 방해한다. 그림 30-4에서 자석의 N극이 가까워지면 전류고리 안에 자기다발이 증가하므로 전류고리에 전류가 유도된다. 그러면 그림 29-21처럼 전류고리는 S극과 N극을 가진 자기쌍극자로 작용하는데, 자기 쌍극자모멘트  $\vec{\mu}$ 의 방향은 S극에서 N극으로 향한다. 자석이 가까워져서 자기다발이 증가하는 것을 방해하기 위해서는 전류고리의 N극(혹은  $\vec{\mu}$ )이 다가오는 자석의 N극을 향해야 한다(그림 30-4 참조). 이때 그림 29-21의 자기 쌍극자모멘트  $\vec{\mu}$ 에 대한 오

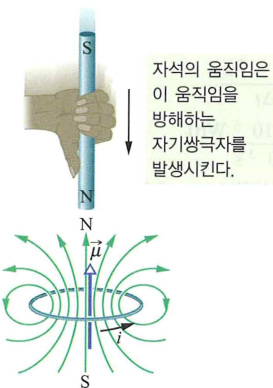


그림 30-4 Lenz의 법칙. 자석이 전류고리를 향하여 움직일 때 전류고리에 전류가 유도된다. 유도전류는 자체 자기장을 생성하여 자석의 운동을 방해하는 방향을 갖는 자기 쌍극자모멘트  $\vec{\mu}$ 를 만든다. 따라서 유도전류는 그림과 같이 반시계 방향이다.

른손 규칙을 사용하면 전류고리에 유도되는 전류의 방향이 반시계방향임을 알 수 있다.

만일 전류고리로부터 자석이 멀어지게 움직이면 전류고리에는 전류가 다시 유도된다. 그러나 이때는 전류고리의 S극이 멀어지는 자석의 N극을 향하게 되므로 자석이 멀어지는 것을 방해하게 될 것이다. 따라서 유도전류는 시계방향으로 생긴다.

2. 자기다발의 변화를 방해한다. 그림 30-4에서 자석이 처음에는 멀리 있어서 전류고리를 통과하는 자기다발이 없다. 그러나 자석의 N극이 전류고리에 가까워지게 되면 전류고리를 통과하는 아래쪽을 향하는 자기장  $\vec{B}$ 의 자기다발이 증가한다. 자기다발의 증가를 방해하기 위해 그림 30-5a처럼 유도전류  $i$ 는 전류고리의 내부에서 위쪽을 향하는 방향으로 자신의 자기장  $\vec{B}_i$ 를 만들어야 한다. 그래야만 오른쪽을 향하는 자기장  $\vec{B}_i$ 의 자기다발이 아래쪽을 향하는 자기장  $\vec{B}$ 의 자기다발이 증가하는 것을 막을 수 있기 때문이다. 따라서 그림 29-21의 오른손 규칙에 따라 유도전류  $i$ 는 그림 30-5a처럼 반시계방향으로 생긴다.

여기서  $\vec{B}_i$ 의 자기다발은 항상  $\vec{B}$ 의 자기다발이 변하는 것을 방해하지만  $\vec{B}_i$ 의 방향이  $\vec{B}$ 에 항상 반대인 것은 아니라는 점에 주목해야 한다. 예를 들어 그림 30-4에서 전류고리로부터 멀어지도록 자석을 당기면 자석에서 나오는 자기다발  $\Phi_B$ 는 여전히 전류고리를 통과하며 아래쪽을 향하지만 이번에는 감소한다. 따라서  $\vec{B}_i$ 의 자기다발은  $\Phi_B$ 의 감소를 막기 위하여 그림 30-5b처럼 전류고리 내부에서 아래쪽을 향해야 한다. 따라서  $\vec{B}_i$ 와  $\vec{B}$ 의 방향은 같아진다.

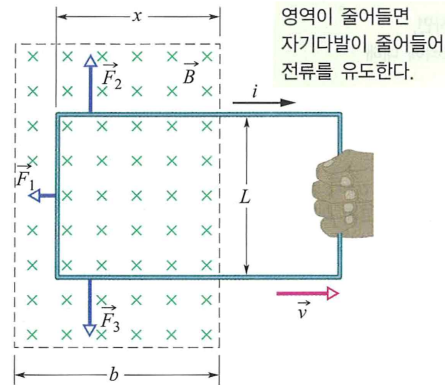
그림 30-5c와 30-5d는 자석의 S극이 전류고리에 가까워질 때와 멀어질 때의 상황이다.



## IV. 운동기전력

### 개념 POINT

Lenz의 법칙에 의하면, 그림 30-1에서 자석이 전류고리를 향하여 움직이거나 멀어지게 움직이거나, 자기력은 외부에서 작용한 힘이 양의 일을 하여 상대운동을 방해한다. 또한 유도된 전류가 흐를 때 물질의 전기저항 때문에 열에너지가 전류고리를 이루는 물질에 생성된다. 결국 외력이 닫힌 전류고리와 자석으로 이루어진 계에 전달하는 에너지가 열에너지로 전환된다(여기서 유도되는 동안 전류고리로부터 전자기파로 방출되는 에너지는 무시하기로 한다). 자석을 빠르게 움



**그림 30-8** 닫힌 도체 전류고리를 등속도  $\vec{v}$ 로 자기장 영역 바깥으로 당긴다. 전류고리가 이동하는 동안 전류고리에 시계방향의 전류  $i$ 가 유도되고, 자기장 영역에 남아 있는 전류고리의 선분은  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$  및  $\vec{F}_3$ 의 힘을 받는다.

직일수록 외력은 훨씬 더 급하게 일을 하고, 전류고리에서 열에너지로 전환되는 비율도 더 커진다. 즉, 전환되는 일률이 더 커진다.

어떻게 전류고리에 전류가 유도되는가에 상관없이 전류고리의 전기저항 때문에 (초전도체가 아니라면) 에너지는 항상 열에너지로 전환된다. 예를 들어 그림 30-2에서 여닫개 S가 닫혀 전류가 왼쪽 고리에 유도될 때 전지의 에너지는 고리의 열에너지로 전환된다.

그림 30-8에는 유도전류가 발생하는 또 다른 경우가 있다. 너비가  $L$ 인 직사각형 전류고리의 한쪽 끝은 고리 면에 수직이고 지면으로 들어가는 방향으로 걸린 균일한 외부 자기장 안에 놓여 있다. 이런 자기장은 커다란 전자석으로 만든다. 그림 30-8의 점선 안에만 자기장이 걸려 있다고 가정하고 전류고리를 등속도  $\vec{v}$ 로 오른쪽으로 잡아당긴다고 하자(가장자리 효과는 무시한다).

그림 30-8이 그림 30-1과 본질적으로 다른 점은 없다. 어느 경우이든 자기장과 전류고리는 상대적으로 운동하므로 전류고리를 통과하는 자기다발도 시간에 따라 변한다. 그림 30-1에서는  $\vec{B}$ 가 변하기 때문에 자기다발이 변하고, 그림 30-8에서는 자기장 속에 남아 있는 전류고리의 면적이 변하기 때문에 자기다발이 변하지만, 그 차이는 중요하지 않다. 두 경우에서 중요한 차이는 그림 30-8의 배열이 훨씬 더 계산하기 쉽다는 것이다. 이제 그림 30-8의 고리를 일정한 비율로 끌어당길 때의 역학적 일률을 계산해 보자.

전류고리를 등속도  $\vec{v}$ 로 당기려면, 가해 주는 힘과 크기가 같고 방향이 반대인 운동을 방해하는 자기력이 전류고리에 작용하므로, 전류고리에 일정한 힘  $\vec{F}$ 를 가해 주어야 한다. 이때 외력이 하는 일의 비율, 즉 일률은 식 7-48로부터 다음과 같다.

$$P = Fv. \quad (30-6)$$

여기서  $F$ 는 당기는 힘의 크기이다. 일률  $P$ 를 자기장의 크기  $B$ 와 전류고리의 특성인 저항  $R$ 과 너비  $L$ 로 표기해 보자.

그림 30-8에서 전류고리를 오른쪽으로 당길수록 자기장 속에 남아 있는 전류고리의 면적이 감소한다. 따라서 전류고리를 통과하는 자기다발도 감소하면서 Faraday의 법칙에 따라 전류고리에



유도전류가 생긴다. 유도전류가 생기는 이유는 고리를 잡아당기는 것을 방해하는 힘이 생기기 때문이다.

전류를 구하기 위해 먼저 Faraday의 법칙을 적용해 보자. 자기장 속에 여전히 남아 있는 전류 고리의 길이가  $x$ 이면 전류고리의 면적은  $Lx$ 이다. 식 30-2를 이용하면 전류고리를 통과하는 자기 다발의 크기는

$$\Phi_B = BA = BLx \quad (30-7)$$

이다. 즉,  $x$ 가 감소함에 따라 자기다발도 감소한다. Faraday의 법칙에 의하면 자기다발의 감소가 전류고리에 기전력을 유도한다. 식 30-4에서 음의 부호를 빼고, 식 30-7을 이용하면 유도기전력의 크기를 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{d}{dt} BLx = BL \frac{dx}{dt} = BLv. \quad (30-8)$$

여기서  $dx/dt$ 는 전류고리가 이동하는 속력  $v$ 이다.

그림 30-9는 기전력  $\mathcal{E}$ 를 왼쪽에, 전류고리의 전체 저항  $R$ 을 오른쪽에 표시한 단일회로 형태의 전류고리이다. 감소하는 자기다발에 의한 유도전류  $i$ 의 방향은 그림 30-5b처럼 오른손 규칙으로 구할 수 있다. 이 규칙을 적용하면 유도전류는 시계방향이고 유도기전력  $\mathcal{E}$ 도 같은 방향이다.

유도전류의 크기를 구하기 위해서 단일회로 내의 퍼텐셜차를 구하기 위한 고리규칙을 적용할 수 없다. 30-6절에서 다루겠지만 유도기전력에 의한 퍼텐셜차를 정의할 수 없기 때문이다. 대신  $i = \mathcal{E}/R$ 을 적용해야 한다. 이제 식 30-8과 함께 쓰면 다음을 얻는다.

$$i = \frac{BLv}{R}. \quad (30-9)$$

그림 30-8에서 전류고리의 자기장 속에 남아 있는 세 선분에는 이 크기의 유도전류가 흐르므로 세 선분들에 옆쪽으로 쓸림힘이 작용한다. 식 28-26으로부터 이러한 쓸림힘은

$$\vec{F}_d = i\vec{L} \times \vec{B} \quad (30-10)$$

이다. 그림 30-8에서 전류고리의 세 선분에 작용하는 쓸림힘을  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$  및  $\vec{F}_3$ 로 표시하였다. 그러나  $\vec{F}_2$ 와  $\vec{F}_3$ 는 대칭으로 크기가 같고 방향이 반대이므로 서로 상쇄된다. 따라서 전류고리에 작용하는 힘은 단지  $\vec{F}_1$ 뿐이며 고리를 자기장 바깥으로 당기는 힘  $\vec{F}$ 와 반대이다. 즉  $\vec{F} = -\vec{F}_1$ 이다.

식 30-10을 이용하면  $\vec{B}$ 와 왼쪽 선분의 길이벡터  $\vec{L}$ 의 사이각이  $90^\circ$ 이므로  $\vec{F}_1$ 의 크기는

$$F = F_1 = iLB \sin 90^\circ = iLB \quad (30-11)$$

이다. 한편 식 30-11의  $i$ 를 식 30-9로 바꾸면 다음과 같다.

$$F = \frac{B^2 L^2 v}{R}. \quad (30-12)$$

$B$ ,  $L$  및  $R$ 이 일정하므로 고리를 움직이기 위해 가해진 힘이 일정하면, 전류고리가 이동하는 속력  $v$ 도 일정하다.

식 30-12를 식 30-6에 넣으면 자기장으로부터 전류고리를 당길 때의 일률은 다음과 같다.

$$P = Fv = \frac{B^2 L^2 v^2}{R} \quad (\text{일률}). \quad (30-13)$$

이번에는 등속도로 당기는 전류고리에 열에너지가 나타나는 비율을 구해 보자. 식 26-27인

$$P = i^2 R \quad (30-14)$$

에서,  $i$ 를 식 30-9로 바꾸면 다음을 얻는다.

$$P = \left( \frac{BLv}{R} \right)^2 R = \frac{B^2 L^2 v^2}{R} \quad (\text{열에너지 방출률}). \quad (30-15)$$

이 결과는 식 30-13의 고리에 해준 일률과 정확하게 일치한다. 따라서 자기장 안에서 전류고리를 당길 때 한 일은 모두 전류고리에서 열에너지로 전환된다.

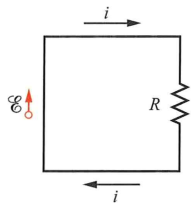


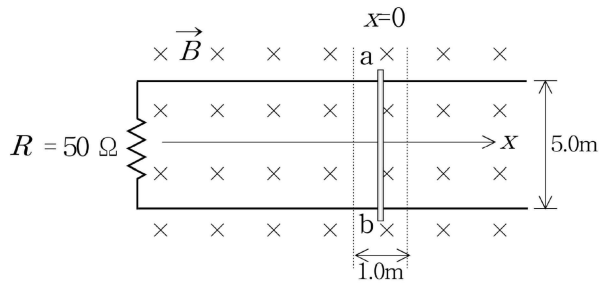
그림 30-9 전류고리가 움직일 때 그림 30-8의 전류고리를 단일회로로 본 그림.

■ 변리사 기출문제

개념 POINT

1. [2006년 변리사] (중)

아래 <그림>과 같이 저항  $R=50\Omega$ 이 연결된 도선 위에 금속 막대  $ab$ 가 놓여 있고, 도선과 막대가 이루는 평면에 대하여 수직 방향으로 들어가는  $2.0T$ 크기의 균일한 자기장  $\vec{B}$ 가 걸려 있다. 금속 막대  $ab$ 가  $x=0$ 을 중심으로 진동폭  $1.0m$ , 최대 속력  $3.0m/s$ 의 단진동(harmonic oscillation)을 한다고 할 때, 저항  $R$ 에서 소모되는 평균전력은 얼마인가?<sup>1)</sup>

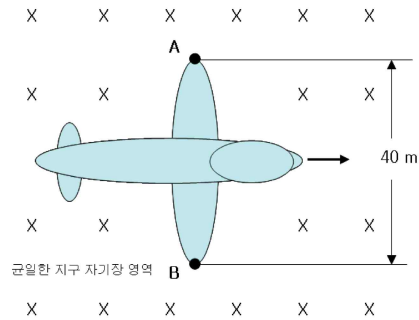


<그림>

- ①  $2.0W$       ②  $3.0W$       ③  $4.0W$       ④  $6.0W$       ⑤  $9.0W$

2. [2008년 변리사] (하) - 운동기전력

그림과 같이 날개의 길이가  $40m$ 인 비행기가 동쪽으로  $250m/s$ 의 속력으로 수평하게 날고 있다. 지구 자기장의 방향은 비행기가 날고 있는 수평면에 수직으로 들어가는 방향이고, 이 수평면에서 지구 자기장의 크기는  $2.0 \times 10^{-5} T$ 이며 균일하다. 비행기 날개의 양 끝점 A와 B 사이에 유도되는 기전력의 크기는? (단, 날개는 굽기가 일정하고 길이가  $40m$ 인 금속막대로 가정하고, 비행기 몸체와 공기의 영향은 무시한다.)<sup>2)</sup>

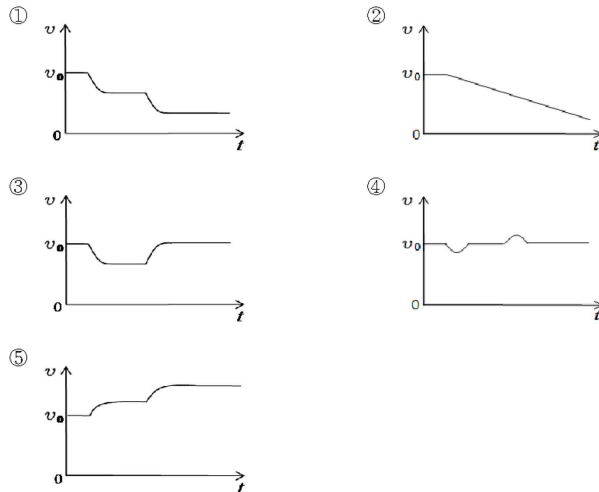
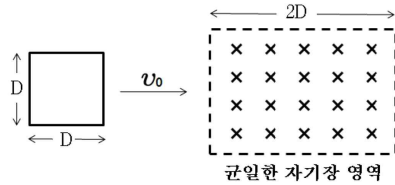


- ①  $4.0 \times 10^{-6} V$     ②  $2.0 \times 10^{-1} V$     ③  $3.2 V$     ④  $8.0 V$     ⑤  $50 V$

개념 POINT

3. [2010년 변리사] (하)

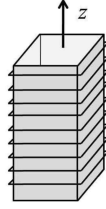
처음 속력이  $v_0$ 인 정사각형 모양의 구리도선이 마찰이 없는 수평면에서 균일한 자기장 영역을 통과하여 운동한다. 정사각형 모양의 구리도선의 폭은  $D$ 이고 자기장 영역의 폭은  $2D$ 이다. 자기장의 방향은 수평면에 수직으로 들어가는 방향이다. 이 구리도선이 자기장 영역에 들어가기 전부터 자기장 영역을 완전히 나간 후까지 구리도선의 속력  $v$ 를 시간  $t$ 에 따라 개략적으로 나타낸 그래프로 가장 적절한 것은? (단, 자기장은 시간에 따라 변하지 않는다.)<sup>3)</sup>



개념 POINT

4. [2011년 변리사] (하) 유도기전력 - 미분

그림과 같이 한변의 길이가  $1m$ 인 정사각형의 단면을 갖는 기둥에 도선을 200회 감아 코일을 만들었다. 이 코일에  $z$ 축 방향으로 시간  $t$ 에 따라 변하는 자기장  $B(t) = 10^{-3} \times (10t - t^2)$ 를 가했을 때,  $t=1$ 인 순간 기전력의 크기는 얼마인가? (단,  $t$ 의 단위는 초(s), 자기장의 단위는 테슬라(T)이고, 기둥은 자성체가 아니다.)<sup>4)</sup>

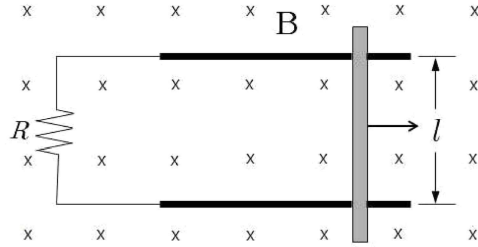


- ①  $0.8V$       ②  $1.2V$       ③  $1.6V$       ④  $2.0V$       ⑤  $2.4V$

개념 POINT

5. [2015년 변리사] (상) - 미분방정식

그림과 같이 저항  $R$ 이 연결되어 있는 폭  $l$ 인 평행한 두 금속 레일 위에 질량이  $m$ 인 금속막대가 오른쪽으로 미끄러져 간다. 자기장( $\vec{B}$ )은 금속막대와 레일이 놓여 있는 지면에 수직하게 들어가는 방향으로 균일하게 지난다. 금속막대의 속력은  $t=0$ 초에서  $3m/s$ ,  $t=3$ 초에서  $1m/s$ 이다. 자기장의 세기  $B$ 는? (단, 막대와 레일 사이의 마찰과 접촉 저항은 무시한다.)<sup>5)</sup>



①  $B = \sqrt{\frac{mRln3}{4l^2}}$

②  $B = \sqrt{\frac{mRln4}{3l^2}}$

③  $B = \sqrt{\frac{mRln2}{3l^2}}$

④  $B = \sqrt{\frac{mRln3}{2l^2}}$

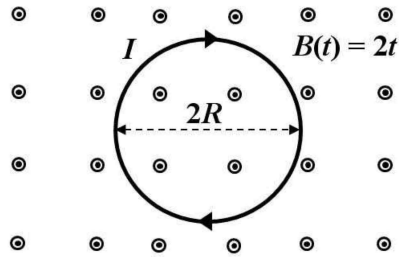
⑤  $B = \sqrt{\frac{mRln3}{3l^2}}$

개념 POINT



6. [2017년 변리사] (하) 유도전류

그림과 같이 시간  $t(\text{sec})$ 에 따라 증가하는 자기장  $B(t) = 2t(\text{Tesla})$ 를 반지름  $R = 1\text{m}$ 인 원형 도체의 단면에 수직하게 가할 경우, 원형 도체에 유도전류  $I$ 가 흐른다.



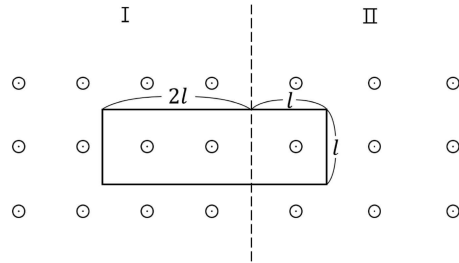
원형 도체의 총 저항값이  $8\Omega$ 일 경우, 유도전류  $I(\text{Ampere})$ 의 세기는? (단, 자기장은 공간적으로 균일하며, 원형 도체의 두께와 전자기파 발생은 무시한다.)<sup>6)</sup>

- ①  $\pi/4$       ②  $\pi/2$       ③  $\pi$       ④  $2\pi$       ⑤  $4\pi$

개념 POINT

7. [2020년 변리사]

그림과 같이 지면으로부터 나오는 방향의 균일한 자기장 영역 I, II에 가로, 세로의 길이가 각각  $3l$ ,  $l$ 인 직사각형 모양의 도선이 고정되어 있다. 자기장 영역 I과 II에서 시간에 따라 변하는 자기장의 세기는 각각  $2at$ ,  $at+b$ 이다. 도선에 유도되는 기전력의 크기는? (단,  $a$ ,  $b$ 는 상수이고, 도선의 두께는 무시한다.)<sup>7)</sup>

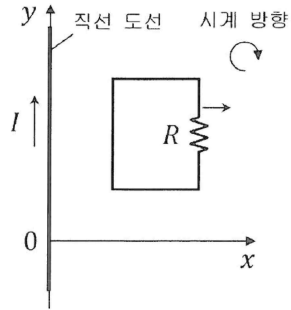


- ①  $al^2$       ②  $2al^2$       ③  $3al^2$       ④  $4al^2$       ⑤  $5al^2$

개념 POINT

8. [2022년 변리사] (하)

그림과 같이 수평면의  $y$ 축 상에 놓여 있는 무한히 긴 직선 도선에 세기  $I$ 인 전류가  $+y$ 방향으로 흐르고 있고, 저항  $R$ 이 연결된 직사각형 회로가 동일한 수평면의  $x > 0$ 인 영역에서  $+x$ 방향으로 운동하고 있다.



이에 관한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?8)

<보기>

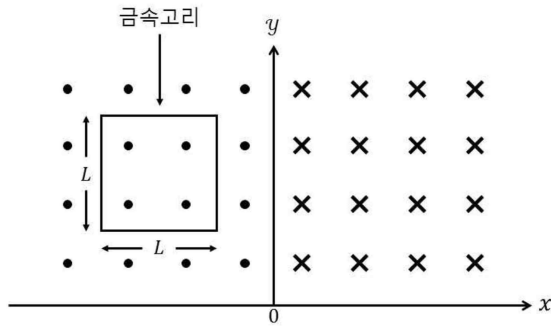
- ㄱ. 직선 도선에 흐르는 전류에 의한 자기장의 방향은 직사각형 회로를 뚫고 들어가는 방향이다.
- ㄴ. 저항에는 시계방향으로 유도전류가 흐른다.
- ㄷ. 직선 도선과 직사각형 회로 사이에는 인력이 작용한다.

- ① ㄱ                      ② ㄴ                      ③ ㄱ, ㄴ                      ④ ㄴ, ㄷ                      ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

개념 POINT

9. [2023년 변리사] (상)

그림과 같이  $x$ 축에 수직한 면을 경계로 하여 크기가 일정한 값  $B$ 로 균일한 자기장이  $\pm z$ 방향으로 나오고 들어가며, 한 변의 길이가  $L$ 인 정사각형 금속 고리가  $+x$ 축 방향으로 등속도 운동하고 있다. 금속 고리에 전류가 유도되지 않다가 시간  $\Delta t$ 동안만 일정한 전류  $I$ 가 유도될 때, 금속 고리의 저항은?9)



①  $\frac{BL^2}{4I\Delta t}$

②  $\frac{BL^2}{2I\Delta t}$

③  $\frac{BL^2}{I\Delta t}$

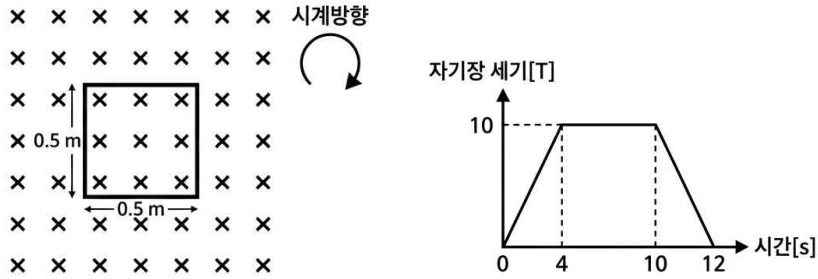
④  $\frac{2BL^2}{I\Delta t}$

⑤  $\frac{4BL^2}{I\Delta t}$

개념 POINT

10. [2026년 변리사] (상)

그림 (가)와 같이 지면에 수직으로 들어가는 방향의 균일한 자기장 영역에 저항이  $5\Omega$  이고, 한 변의 길이가  $0.5m$ 인 정사각형 도선이 놓여 있다. 자기장의 세기는 그림 (나)와 같이 시간에 따라 변한다. 시간이 2초인 순간과 11초인 순간에 도선에 유도되는 전류는 각각  $I_1$ 과  $I_2$ 이다.



이에 관한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 도선은 지면과 평행하고 놓여 있다.)<sup>10)</sup>

<보기>

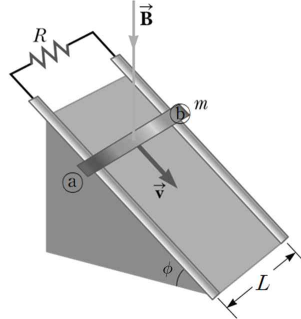
- ㄱ.  $I_1$ 의 방향은 시계방향이다.
- ㄴ. 6초인 순간에 전류는 흐르지 않는다.
- ㄷ.  $I_2$ 의 크기는  $0.25A$ 이다.

- ① ㄱ                      ② ㄴ                      ③ ㄱ, ㄷ                      ④ ㄴ, ㄷ                      ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

개념 POINT

■ 개념확인문제

11. 그림은 질량이  $m$ 이고 길이가  $L$ , 저항이  $R$ 인 금속 막대가 수평면과  $\phi$ 의 각도를 이루는 마찰이 없는 금속 레일 위에서 정지해 있다가 미끄러져 내려오고 있다. 균일한 자기장  $B$ 는 수직 아래 방향으로 향하고 있다. 아래 질문에 답하시오. (단, 중력 가속도는  $g$ , 금속 레일의 전기 저항, 공기 저항은 무시한다.)<sup>11)</sup>



- (1) 금속 막대의 양 끝의 위치를 각각 ①, ②라고 할 때, 금속 막대가 속도  $v$ 로 미끄러져 내려오는 순간 금속 막대에 흐르는 전류의 방향과 그 크기를 구하시오.
- (2) 금속 막대의 종단 속도  $v_t$ 를 주어진 물리량을 이용해 구하시오.
- (3) 금속 막대가 종단 속력에 도달했을 때, 금속 막대에서 열에너지로 전환되는 전력을 주어진 물리량을 이용해 구하시오.

개념 POINT

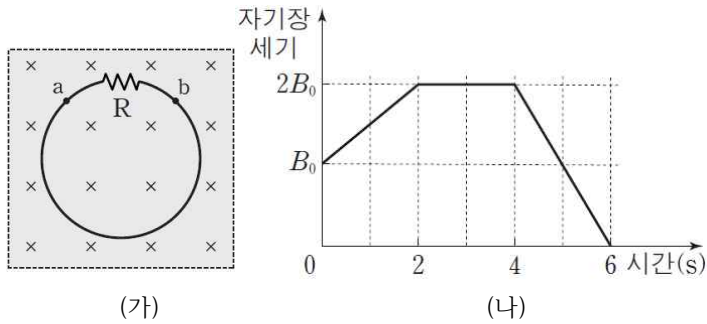


12. 반지름이 10 cm 이고 100번 감은 원형코일을 전자석의 두 극 사이의 균일한 자기장 속에 놓았다. 자기장의 세기가 매초 0.1 T 씩 만큼씩 증가한다고 할 때, 코일에 형성되는 유도 기전력의 크기는? (단, 자기장의 방향은 코일 면에 수직이다.)<sup>12)</sup>

개념 POINT

- ① 0      ②  $0.001 \pi$       ③  $0.01 \pi$    ④  $0.1 \pi$       ⑤  $\pi$

13. 그림 (가)와 같이 저항  $R$ 가 연결된 원형 도선이 균일한 자기장 영역에 고정되어 있다. 자기장의 방향은 도선이 이루는 면에 수직으로 들어가는 방향이다. 그림 (나)는 자기장의 세기를 시간에 따라 나타낸 것이다.



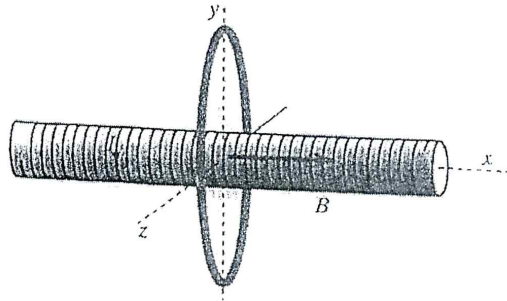
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?<sup>13)</sup>

—<보 기>—

- ㄱ. 1초일 때 유도 전류는  $a \rightarrow R \rightarrow b$  방향으로 흐른다.  
 ㄴ. 3초일 때 유도 기전력은 0이다.  
 ㄷ. 5초일 때 유도 전류의 세기는 1초일 때의  $\frac{2}{3}$ 배이다.

- ① ㄱ                      ② ㄴ                      ③ ㄱ, ㄴ                      ④ ㄱ, ㄷ                      ⑤ ㄴ, ㄷ

14. 그림은 전류  $I$ 가 흐르는 반지름  $2\text{cm}$ 인 솔레노이드 주위를 반지름  $10\text{cm}$ 인 원형 금속 고리가 동심원으로 놓여 있는 모습이다. 솔레노이드 안의 자기장은  $0.5\text{T}$ 이고, 바깥의 자기장은  $0$ 이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?<sup>14)</sup>

<보 기>

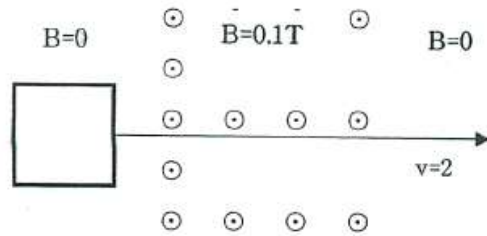
- ㄱ. 금속 고리를 통과하는 자속은  $2\pi \times 10^{-4}\text{Wb}$ 이다.  
 ㄴ. 전류를  $2I$ 로 증가시키면 자속은 4배 증가한다.  
 ㄷ. 전류를  $0.5\text{초}$  동안  $I$ 에서  $2I$ 로 일정하게 증가시키면 바깥 금속 고리에  $4\pi \times 10^{-4}\text{V}$ 의 유도 기전력이 발생한다.

- ① ㄱ                      ② ㄴ                      ③ ㄷ                      ④ ㄱ, ㄴ                      ⑤ ㄴ, ㄷ

개념 POINT

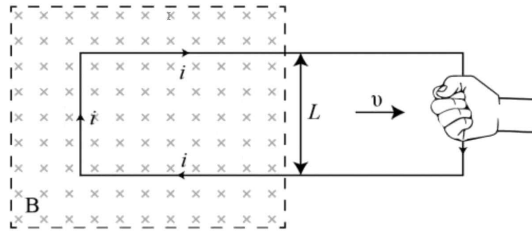
15. 한 변의 길이가 0.2 m이고 총 저항이 4 Ω인 정사각형 고리 도선이, 자기장이 없던 영역에서 0.1 T의 균일한 자기장이 있는 영역을 지나 다시 자기장 없는 영역으로 속력 2 m/s로 관통하고 있다. 자기장 없는 영역으로 빠져 나올 때의 유도 전류의 방향과 크기는 얼마인가?<sup>15)</sup>

개념 POINT



- ① 반시계방향, 0.01 A      ② 반시계방향, 0.02 A      ③ 시계방향, 0.01 A  
 ④ 시계방향, 0.02 A      ⑤ 시계방향, 0.1 A

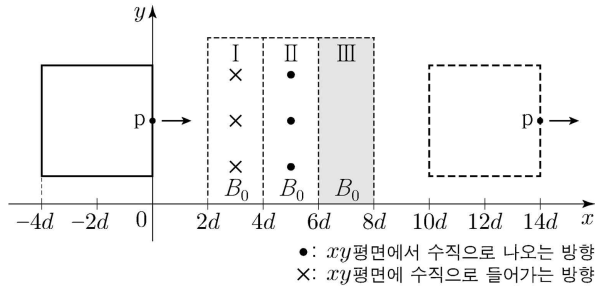
16. 3번 감긴 사각 도선을 그림과 같이 지면에 수직인 자기장이 걸려있는 공간에서 지면에 평행하게 오른쪽으로 빼내고 있다. 이 때 자기장의 세기는  $B = 1\text{ T}$ , 사각 도선의 폭은  $L = 10\text{ cm}$ , 도선의 전체 저항은  $R = 10\ \Omega$ , 사각 도선을 오른쪽으로 빼내는 속력은  $v = 20\text{ cm/s}$ 이다. 도선에 유도되는 전체 전류의 세기는?<sup>16)</sup>



- ① 3mA      ② 4mA      ③ 6mA      ④ 8mA      ⑤ 10mA

개념 POINT

17. 그림과 같이 한 변의 길이가  $4d$ 인 정사각형 금속 고리가  $xy$ 평면에서  $+x$ 방향으로 등속도 운동하며 자기장의 세기가  $B_0$ 으로 같은 균일한 자기장 영역 I, II, III을 지난다. 금속 고리의 점 p가  $x=7d$ 를 지날 때, p에는 유도 전류가 흐르지 않는다. III에서 자기장의 방향은  $xy$ 평면에 수직이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?<sup>17)</sup>

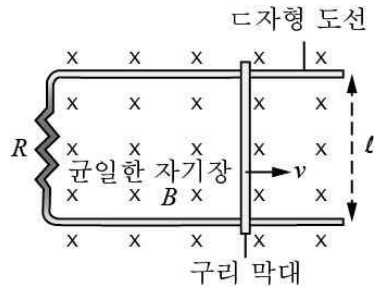
<보 기>

- ㄱ. 자기장의 방향은 I에서와 III에서가 같다.  
 ㄴ. p가  $x=3d$ 를 지날 때, p에 흐르는 유도 전류의 방향은  $+y$ 방향이다.  
 ㄷ. p에 흐르는 유도 전류의 세기는 p가  $x=5d$ 를 지날 때가  $x=3d$ 를 지날 때보다 크다.

- ① ㄱ                      ② ㄷ                      ③ ㄱ, ㄴ                      ④ ㄴ, ㄷ                      ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ



18. 그림과 같이 저항  $R$ 이 연결된 충분히 긴 'ㄷ'자 모양의 도선이 균일한 자기장  $B$ 속에 놓여 있다. 이 도선 위에서 길이  $\ell$ 인 구리 막대를 외부에서 힘을 주어 일정한 속력  $v$ 로 이동시키고 있다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 모두 고른 것은? (단, 도선과 구리 막대의 저항은 무시한다.)<sup>18)</sup>



<보기>

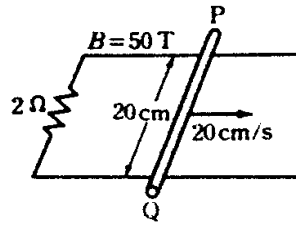
- ㄱ. 외부에서 작용하는 힘이 하는 일률은  $\frac{B^2 \ell^2 v^2}{R}$ 이다.
- ㄴ. 저항에서 소모되는 단위 시간당 에너지는  $\frac{B^2 \ell^2 v^2}{R}$ 이다.
- ㄷ. 외부에서 작용하는 힘을 제거하면 막대의 속력은 점점 감소한다.

- ① ㄷ                      ② ㄱ, ㄴ                      ③ ㄱ, ㄷ                      ④ ㄴ, ㄷ                      ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

개념 POINT

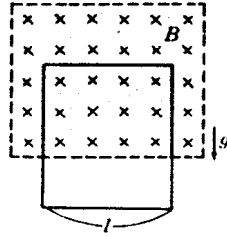
19. 그림과 같은 ㄷ자형 도선에 마찰 없이 움직일 수 있는 도선 PQ가 놓여 있고, 자기장이 ㄷ자형 도선에 수직하게 걸려 있다.<sup>19)</sup>

개념 POINT



- (1) 자기장이 50T라면, 도선 PQ를 오른쪽으로 20cm/s의 속도로 당길 때 발생하는 유도기전력은 얼마인가?
- (2) 이때 저항에서는 매초 몇 J의 열에너지가 발생하겠는가?
- (3) 도선 PQ를 계속 20cm/s의 속도로 잡아당기기 위해서는 몇 N의 힘이 필요한가?

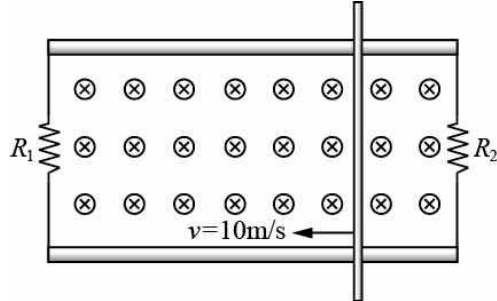
20. 그림과 같이 중력과 수직한 방향의 균일한 자기장  $B$  속에 들어 있는, 한 변의 길이가  $l$  인 직사각형 도선이 중력 방향으로 떨어지고 있다. 도선이 그림과 같이 된 순간부터 자기장을 완전히 벗어날 때까지 속도가 변하지 않았다고 한다.(단, 도선의 저항은  $R$ , 질량은  $m$  이며, 중력 가속도는  $g$ 이다.)<sup>20)</sup>



- (1) 도선에 유도되는 전류는 얼마인가?
- (2) 단위 시간 동안에 도선에서 소비되는 전기 에너지는 얼마인가?
- (3) 이 도선의 위치 에너지의 시간당 변화는 얼마인가?

개념 POINT

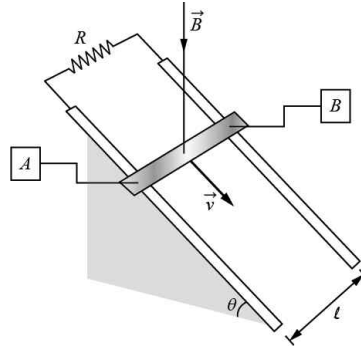
21. 그림과 같은 높이 1 m, 폭 3 m의 직사각형 공간에  $B = 1.0 \text{ T}$ 의 자기장이 들어가는 방향으로 걸려있고, 그 위아래는 도체에 의해 둘러싸여 있다. 좌우측에는 각각  $R_1 = 200 \Omega$  및  $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ 의 저항이 연결되어 있다. 위아래의 두 개의 도체에 또 하나의 직선 도체가 그림처럼 걸쳐 있어서 왼쪽으로  $v = 10 \text{ m/s}$ 의 속도로 움직인다. 이 때 직선 도체에 흐르는 전류의 크기와 방향을 구하시오.<sup>21)</sup>



- |                   |                |
|-------------------|----------------|
| ① 아래 방향으로 40 mA   | ② 위 방향으로 40 mA |
| ③ 아래 방향으로 60 mA   | ④ 위 방향으로 60 mA |
| ⑤ 0.0 mA (흐르지 않음) |                |

개념 POINT

22. 그림과 같이 질량  $m = 0.100 \text{ kg}$ 인 도체 막대가 마찰이 없는 도체 레일 위에서 미끄러져 내려가는 모습을 나타내고 있다. 두 레일 사이의 거리  $l = 1.00 \text{ m}$ 이고, 경사각  $\theta = 30^\circ$ 이다. 저항  $R = 1.00 \Omega$ 이고 균일한 자기장  $B = 0.100 \text{ T}$ 가 지면에 수직으로 아래로 향한다. 다음 물음에 답하시오. (단, 저항  $R$  이외의 모든 저항은 무시하고,  $g = 10.0 \text{ m/s}^2$ 이다.)

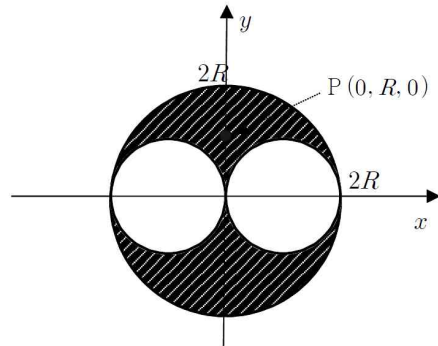


- 1) 경사면을 따라 내려오는 막대의 일정한 속력  $v$ 를 구하시오.
- 2) 중력이 한 일률을 구하시오.
- 3) 도체막대 위 A와 B지점 중 전위가 높은 지점은?

개념 POINT

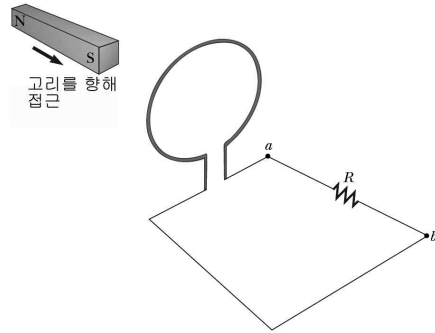
23.  $z$ 축과 나란하고 반지름  $2R$ 인 무한 도선에 각각  $z$ 축과 나란하고 반지름  $R$ 인 구멍이 그림과 같이 뚫려 있다. 이 도선에  $+z$ 방향으로 균일한 전류  $I$ 가 흐르고 있을 때, 도선의 내부 점 P에서의 자기장의 크기와 방향을 구하시오. ( $\mu_0$ 는 진공에서의 투자율이다.)<sup>22)</sup>

개념 POINT





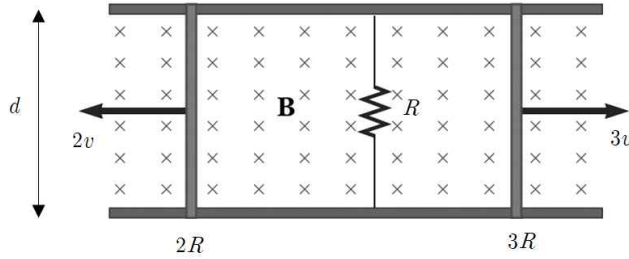
24. 다음 그림과 같이 막대 자석이 원형 고리를 향해 움직인다. 두 점  $a, b$ 사이의 전위차  $V_a - V_b$ 는 양수인가? 음수인가? 0인가? 이유를 설명하라.<sup>23)</sup>



개념 POINT

25. 저항을 무시할 수 있는 두 개의 평행 레일이 거리  $d$ 만큼 떨어져 있고 저항  $R$ 이 연결되어 있다. 저항이 각각  $2R$ ,  $3R$ 인 금속 막대가 레일 위에서 움직이고 있다. 금속 막대는 각각 속력  $2v$ ,  $3v$ 로 중심으로부터 멀어지고 있으며 균일한 자기장  $B$ 가 지면을 들어가는 방향으로 작용하고 있다. 저항  $R$ 에 흐르는 전류의 세기를 구하시오.

개념 POINT



- ① 0      ②  $\frac{2Bdv}{3R}$       ③  $\frac{3Bdv}{2R}$       ④  $\frac{Bdv}{R}$       ⑤  $\frac{2Bdv}{R}$

1) [정답] ⑤

[해설]

자기장 내에서 운동하는 막대에 유도되는 운동기전력은  $\epsilon = Blv = 2.0 \times 5 \times v = 10v$ 이다. 따라

서 저항  $R$ 에서 소모되는 순간전력은  $P = \frac{\epsilon^2}{R} = \frac{(10v)^2}{50} = 2v^2$ 이다.

금속막대  $ab$ 가 단진동하므로  $v(t) = v_{\max} \sin(\omega t) = 3 \sin(\omega t)$ 이다.

따라서 한 주기 동안의 속력의 제곱  $v^2 = 9 \sin^2(\omega t)$ 의 평균을 구하면  $v_{\text{avg}}^2 = 9 \times \frac{1}{2} = \frac{9}{2}$ 이므로

평균전력은  $p_{\text{avg}} = 2 \times \frac{9}{2} = 9 \text{ W}$ 이다.

2) [정답] ②

[해설]

균일한 자기장 내에서 자기장에 수직한 방향으로 운동하는 도체 막대에 유도되는 기전력은

$$\epsilon = Blv = (2.0 \times 10^{-5}) \times 40 \times 250 = 2.0 \times 10^{-1} \text{ V}$$
이다.

3) [정답] ①

[해설]

1. 자기장에 진입하기 전에는  $v_0$ 로 등속도운동한다.

2. 자기장에 진입하면 도선이 완전히 자기장 영역 안에 들어오기 전까지 렌츠의 법칙에 의해 운동을 방해하는 방향으로 자기력이 작용하므로 속력이 감소한다.

3. 자기장에 완전히 진입하면 유도전류가 흐르지 않으므로 등속도 운동한다.

4. 자기장을 빠져 나오는 경우에도 렌츠의 법칙에 의해 운동을 방해하는 방향으로 자기력이 작용하므로 속력이 감소한다.

5. 자기장을 완전히 빠져 나오면 등속도 운동을 한다.

4) [정답] ③

[해설]

패러데이의 전자기 유도법칙에 따르면  $\epsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -NA \frac{dB}{dt}$ 이다.

$N = 200$ ,  $A = 1 \text{ m}^2$ ,  $\frac{dB}{dt} = 10^{-3} \times (10 - 2t)$ 이므로  $B'(1) = 8 \times 10^{-3}$ 을 대입하면

$$\epsilon = -200 \times 1 \times (8 \times 10^{-3}) = -1.6 \text{ V}$$
이다.

5) [정답] ⑤

[해설]

막대가 속도  $v$ 로 운동하므로 막대에는 유도기전력  $\epsilon = Blv$ 가 발생하며 회로에 흐르는 유도전

류는  $I = \frac{Blv}{R}$ 이다. 유도전류에 의해 막대는 자기력  $F = BI l = B \times \frac{Blv}{R} \times l = \frac{B^2 l^2 v}{R}$ 을 받고 자

기력의 방향은 막대의 운동방향과 반대이다. 따라서  $ma = -\frac{B^2 l^2 v}{R}$ 이므로  $m \frac{dv}{dt} = -\frac{B^2 l^2 v}{R}$ 이고

변수분리하면  $\frac{1}{v} dv = -\frac{B^2 l^2}{mR} dt$ 이다.

양변을 주어진 구간에 대하여 적분하면  $\int_3^1 \frac{1}{v} dv = \int_0^3 -\frac{B^2 l^2}{mR} dt$ 이고  $\ln\left(\frac{1}{3}\right) = -\frac{B^2 l^2}{mR} (3 - 0)$ 에

서 정리하면  $B = \sqrt{\frac{mR \ln 3}{3l^2}}$ 이다.

개념 POINT

6) [정답] ①

[해설]

패러데이의 전자기 유도법칙에 따르면  $\epsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -NA \frac{dB}{dt}$  이다.

$N=1$ ,  $A=\pi r^2=\pi \times 1^2=\pi m^2$ ,  $\frac{dB}{dt}=2$ 이므로  $\epsilon = -1 \times \pi \times 2 = -2\pi V$ 이다.

따라서 유도전류는  $I = \frac{\epsilon}{R} = \frac{2\pi}{8} = \frac{\pi}{4} A$ 이다.

7) [정답] ⑤

[해설]

패러데이의 전자기 유도법칙에 따르면  $\epsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -NA \frac{dB}{dt}$  이다. 자기장 영역 I과 II에서 시간에 따라 변하는 자기장의 세기는 각각  $2at$ ,  $at+b$ 이므로 두 영역을 지나는 자기선속을 구하면 각각  $2at \times 2l^2$ ,  $(at+b) \times l^2$ 이고 모두 지면으로부터 나오는 방향이므로 총 자기선속은  $\Phi_B = 4atl^2 + (at+b)l^2 = (5at+b)l^2$ 이다.

$\frac{d\Phi_B}{dt} = 5al^2$ 이므로 도선에 유도되는 기전력은  $\epsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -1 \times 5al^2 = -5al^2$ 이다.

8) [정답] ⑤

[해설]

- ㄱ. 오른손 규칙에 의하면 직선 도선에 흐르는 전류에 의한 자기장의 방향은 직사각형 회로를 뚫고 들어가는 방향이다. (참)
- ㄴ. 저항  $R$ 이 연결된 직사각형 회로가 동일한 수평면의  $x > 0$ 인 영역에서  $+x$ 방향으로 운동하고 있으므로 직사각형 회로를 통과하는 자기력선속은 감소한다. 따라서 자기력선속을 유지 하기 위해서 유도전류는 시계방향으로 흐른다.
- ㄷ. 유도전류가 시계방향으로 흐르므로 직선도선과 직사각형 회로의 왼쪽 변은 같은 방향의 전류가 흐르고 따라서 인력이 작용한다. 이 때 직선도선과 직사각형 회로의 오른쪽 변은 다른 방향의 전류가 흐르므로 척력이 작용한다. 이때 인력이 척력보다 크므로 직선 도선과 직사각형 회로 사이에는 인력이 작용한다. (참)

9) [정답] ④

[해설]

금속고리가  $y$ 축을 통과할 때 자기장의 방향이 바뀌므로 이 때 금속고리를 통과하는 자기선속이 변화하여 유도기전력이 발생한다. 이때  $y$ 축을 기준으로 왼쪽은 자기력선이 나오는 방향을 계속 유지하려고 하고 오른쪽은 자기력선이 들어가는 방향을 방해하려고 하기 때문에 금속고리 전체적으로는 자기력선이 나오는 방향으로 유도전류가 흐른다. 따라서 유도전류의 방향은 반시계방향이 된다. 금속고리가  $y$ 축을 통과하는 동안의 자기선속의 변화량은

$$\Delta\Phi_B = (\Delta B)L^2 = (-B-B)L^2 = -2BL^2 \text{이므로}$$

$$\text{유도기전력은 } \epsilon = -N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -1 \times \frac{-2BL^2}{\Delta t} = \frac{2BL^2}{\Delta t} \text{이므로 } R = \frac{\epsilon}{I} = \frac{2BL^2}{I\Delta t} \text{이다.}$$

10) [정답] ④

[해설]

1. 도선의 면적은  $A = 0.5m \times 0.5m = 0.25m^2$ 이다.

2. 유도기전력은  $V = A \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right|$ 이므로 자기장-시간 그래프의 기울기를 파악해야 한다.

개념 POINT

ㄱ. 2초인 순간의 전류  $I_1$ 는 0초부터 4초까지 들어가는 방향으로 자기장이 증가하므로 렌츠의 법칙에 의해 반시계 방향으로 흐른다. (거짓)

ㄴ. 6초인 순간에는 4초부터 10초까지 자기장이 일정하므로 유도전류가 흐르지 않는다. (참)

ㄷ. 11초인 순간의 전류  $I_2$ 는 10초부터 12초까지 들어가는 방향으로 자기장이 감소하므로 렌츠의 법칙에 의해 시계방향으로 유도전류가 흐르며 이 때 유도기전력의 크기는

$$V = A \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| = 0.25 \times \left| \frac{10}{2} \right| = 1.25 \text{ V} \text{이다. 따라서 유도전류는 } I = \frac{V}{R} = \frac{1.25}{5} = 0.25 \text{ A} \text{이다.}$$

11) [정답] (1) ㉠에서 ㉢ (2)  $v = \frac{mgR \sin \phi}{(BL \cos \phi)^2}$

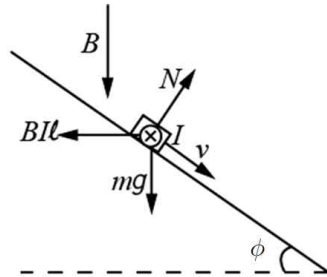
(3)  $\frac{m^2 g^2 R \sin^2 \phi}{B^2 L^2 \cos^2 \phi}$

[해설]

(1) 위에서 볼 때, 회로에서 아래로 내려가는 자속이 감소하므로 위에서 볼 때 반시계 방향의 기전력이 생긴다. 따라서 유도 전류는 ㉠에서 ㉢을 향한다. 또는  $\vec{v} \times \vec{B}$ 의 방향은 ㉠에서 ㉢이므로 전류는 ㉠에서 ㉢을 향한다.

(2) 유도기전력은  $\mathcal{E} = BLv \cos \phi$

$I = \frac{\mathcal{E}}{R}$ 의 유도전류가 받는 자기력이 그림과 같이 수평 방향 왼쪽이다.



빗면에 평행한 방향 힘 평형에서  $BIL \cos \phi = mg \sin \theta \Rightarrow \frac{(BL \cos \phi)^2 v}{R} = mg \sin \phi$

따라서  $v = \frac{mgR \sin \phi}{(BL \cos \phi)^2}$ 이다.

(3) 금속 막대에서의 전력은

$$P = \frac{\mathcal{E}^2}{R} = \frac{B^2 L^2 v^2}{R} \cos^2 \phi = \frac{B^2 L^2}{R} \cos^2 \phi \frac{(mgR \sin \phi)^2}{(BL \cos \phi)^4} = \frac{m^2 g^2 R \sin^2 \phi}{B^2 L^2 \cos^2 \phi}$$

또는  $P = mg \sin \theta v = mg \sin \phi \left\{ \frac{mgR \sin \phi}{(BL \cos \phi)^2} \right\} = \frac{m^2 g^2 R \sin^2 \phi}{B^2 L^2 \cos^2 \phi}$ 로 계산할 수도 있다.

12) [정답] ㉡ 0.1  $\pi$

[해설]

$$\mathcal{E} = -N \frac{dB}{dt} A = -100 \left( \frac{1}{10} \text{ T/s} \right) \pi (0.1 \text{ m})^2 = -0.1 \pi \text{ V}$$

13) [정답] ㉡ ㄴ

[해설]

ㄱ. 0에서 2초까지 도선이 이루는 면에 수직으로 들어가는 방향의 자기선속이 증가하므로 1초 일 때 유도 전류는  $b \rightarrow R \rightarrow a$  방향으로 흐른다. (X)

ㄴ. 2초에서 4초까지 자기장의 세기가 일정하므로 시간에 따른 자기 선속의 변화율은 0이다. 따라서 3초일 때 유도 기전력은 0이다. (O)

ㄷ. 시간에 따른 자기장 세기의 변화율은 5초일 때가 1초일 때의 2배이므로 유도 전류의 세기는 5초일 때가 1초일 때의 2배이다. (X)

개념 POINT

14) [정답] ⑤

[해설]

ㄱ.  $\Phi_B = BA = (0.5 \text{ T}) \pi (0.02 \text{ m})^2 = 2\pi \times 10^{-4} \text{ Wb}$  (O)

ㄴ. 자속은 전류에 비례하므로 전류가 2배가 되면 자속은 2배 증가한다. (X)

ㄷ.  $V_2 = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{2\pi \times 10^{-4} \text{ Wb}}{0.5 \text{ s}} = -4\pi \times 10^{-4} \text{ V}$  (O)

15) [정답] ① 반시계방향, 0.01 A

[해설] 렌츠의 법칙에 의해 빠져나올 때는 자속의 감소를 방해하는 방향으로 유도 전류가 흐른다. 따라서 반시계방향으로 흐른다.

전류의 크기는  $I = \frac{BLv}{R} = \frac{(0.1 \text{ T})(0.2)(2 \text{ m/s})}{4 \Omega} = 0.01 \text{ A}$

16) [정답] ③ 6 mA

[해설]

운동기전력은  $\varepsilon = NBLv$ 이며, 전류는  $i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{NBLv}{R}$ 이다.

렌츠에 법칙에 의해 전류의 방향은 그림처럼 시계방향이다.

$i = \frac{(3)(1 \text{ T})(0.10 \text{ m})(0.20 \text{ m/s})}{10 \Omega} = 6.0 \times 10^{-3} \text{ A} = 6 \text{ mA}$

17) [정답] ③ ㄱ, ㄴ

[해설] ㄱ. p가  $x=7d$ 를 지날 때, p에는 유도 전류가 흐르지 않으므로, p가  $x=6d$ 에서  $x=8d$ 까지 운동할 때 고리를 통과하는 자기 선속의 변화는 없다. p가  $x=6d$ 에서  $x=8d$ 까지 운동할 때 고리를 통과하는 I에 의한 자기 선속은  $xy$ 평면에 수직으로 들어가는 방향으로 감소하므로, 고리를 통과하는 III에 의한 자기 선속은  $xy$ 평면에 수직으로 들어가는 방향으로 증가해야 한다. 따라서 자기장의 방향은 I에서와 III에서가 같다. (O)

ㄴ. p가  $x=2d$ 에서  $x=4d$ 까지 운동할 때, 고리를 통과하는 자기 선속은  $xy$ 평면에 수직으로 들어가는 방향으로 증가하므로 고리에 흐르는 유도 전류에 의한 자기장의 방향은  $xy$ 평면에서 수직으로 나오는 방향이다. 따라서 p가  $x=3d$ 지날 때, p에 흐르는 유도 전류의 방향은  $+y$ 방향이다. (O)

ㄷ. p가  $x=2d$ 에서  $x=4d$ 까지 운동할 때와  $x=6d$ 에서  $x=8d$ 까지 운동할 때, 시간에 따른 고리를 통과하는 자기장의 변화는  $B_0$ 으로 같다. 따라서 p에 흐르는 유도 전류의 세기는 p가  $x=3d$ 를 지날 때와  $x=5d$ 를 지날 때가 같다. (X)

18) [정답] ③

[해설] ㄱ. 자기력은 방향이 왼쪽이며 크기는

$$F_B = B \frac{Blv}{R} l = \frac{B^2 l^2 v}{R}$$

이다. 등속으로 움직이므로 외력은 자기력과 크기가 같고 방향이 반대이다. 따라서 외력은 속도 방향으로  $B^2 l^2 v / R$ 로 작용한다.

외력의 일률은  $P = Fv = \frac{B^2 l^2 v^2}{R}$ 이다. (O)

ㄴ. 저항에서 소모되는 일률은

$$P_R = I^2 R = \frac{(Blv)^2}{R} = \frac{B^2 l^2 v^2}{R}$$

이다. (O)

ㄷ.외력을 제거하면 운동에너지가 감소하게 되며 막대의 속력은 점점 감소한다. (O)

19) [정답] (1) 2V (2) 2J (3) 10N

[해설] (1)  $V = Blv = 50 \times 0.2 \times 0.2 = 2(V)$

$$(2) P = \frac{V^2}{R} = \frac{2^2}{2} = 2(W) = 2(J/s)$$

(3) 저항에서 발생하는 열에너지와 도선 PQ를 잡아당기는 일률이 같으므로  $P = Fv$ 에서

$$F = \frac{P}{v} = \frac{2}{0.2} = 10(N)$$

20) [정답] (1)  $\frac{mg}{Bl}$  (2)  $\left(\frac{mg}{Bl}\right)^2 R$  (3)  $\left(\frac{mg}{Bl}\right)^2 R$

[해설] (1) 도선이 등속으로 낙하하므로 중력과 전자기력은 같다.  $mg = BI l \quad \therefore I = \frac{mg}{Bl}$

$$(2) P = I^2 R = \left(\frac{mg}{Bl}\right)^2 R$$

(3) 도선의 낙하 속도를  $v$  라고 하면 유도 기전력은  $V = Blv \dots \dots \dots \textcircled{1}$

그런데 도선에 흐르는 전류가  $I = \frac{mg}{Bl}$  이므로 옴의 법칙에서  $V = IR = \frac{mg}{Bl} R \dots \dots \dots \textcircled{2}$

$$\text{위의 두 식 } \textcircled{1}, \textcircled{2} \text{에서 } Blv = \frac{mg}{Bl} R \Rightarrow v = \frac{mgR}{(Bl)^2}$$

$$\text{따라서 일률 } P \text{ 는 } P = Fv = mg \frac{mgR}{(Bl)^2} = \left(\frac{mg}{Bl}\right)^2 R$$

21) [정답] ③ 아래 방향으로 60 mA

[해설]

운동기전력의 방향은  $\vec{v} \times \vec{B}$ 이므로 아랫방향이며 두 저항이 병렬로 연결되어 있으므로

$$I = I_1 + I_2 = \frac{Blv}{R_1} + \frac{Blv}{R_2} = \frac{10V}{200\Omega} + \frac{10V}{1000\Omega} = 60\text{mA}$$

따라서 아래 방향을 60mA가 흐른다.

22) [정답] 0

[해설]

$I$ 가 전체에 흐를 때 앙페르의 법칙에 의하여

$$\vec{B}_0 = \frac{\mu_0 JR}{2}(-\hat{x})$$

이고, 반대로 흐르르 두 개의 작은 구멍이 만드는 자기장은

$$\vec{B}' = 2 \times \frac{\mu_0 JR}{2\sqrt{2}} \times \frac{1}{\sqrt{2}}(+\hat{x}) = \frac{\mu_0 JR}{2}(\hat{x})$$

이다. 따라서

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' = 0$$

이다.

23) [정답] 음수

[해설] 유도 전류는  $b \rightarrow a$ 로 흐른다. 따라서,  $a$ 점 전위가  $b$ 점 전위보다 낮다.