

THEME

15

[전자기]

[1] 전하와 전기력

■ 전기력 작용-반작용

전하를 띠는 물체 사이에 작용하는 전기력은 작용과 반작용이 쌍으로 나타난다. 세 점전하가 있는 경우 각 점전하 사이에 작용하는 전기력 쌍이 셋 있고, 두 점전하를 한 계로 보았을 때 나머지 한 전하와 작용하는 전기력 쌍이 셋 있어 총 여섯 쌍의 작용 반작용 관계가 있다. 문제 풀이에서 자주 활용되는 건 당연한 일이다. 세 점전하 A, B, C 사이에 작용하는 전기력 사이의 관계에 대해 알아보자.

성질

- ① 전기력 쌍 $(F_{AB}, F_{BA}), (F_{BC}, F_{CB}), (F_{CA}, F_{AC})$ 는 작용 반작용 관계에 있다.
- ② 전기력 쌍 $(F_{BA} + F_{CA}, F_{AB} + F_{AC}), (F_{AB} + F_{CB}, F_{BA} + F_{BC}), (F_{AC} + F_{BC}, F_{CA} + F_{CB})$ 는 작용 반작용 관계에 있다.

성질 ①에서 F_{AB} 는 A가 B에 작용하는 전기력을, F_{BA} 는 거꾸로 A에 B가 작용하는 전기력을 뜻한다. 따라서 $F_{AB} = -F_{BA}$ 이며, 나머지 전기력 쌍도 마찬가지이다. 성질 ②에서 $F_{BA} + F_{CA}$ 는 A에 계(B+C)가 작용하는 전기력을, $F_{AB} + F_{AC}$ 는 A가 계(B+C)에 작용하는 전기력을 뜻한다.

	A가 받는 전기력	B가 받는 전기력	C가 받는 전기력	계
A가 가하는 전기력	0	F_{AB}	F_{AC}	$F_B + F_C$
B가 가하는 전기력	F_{BA}	0	F_{BC}	$F_A + F_C$
C가 가하는 전기력	F_{CA}	F_{CB}	0	$F_A + F_B$
계	F_A	F_B	F_C	0

이처럼 전하 쌍이 주고받는 전기력 대신 한 전하가 받는 전기력을 기준으로 작용 반작용 관계를 생각하면 좋은 성질을 많이 얻을 수 있다. 기준이 되는 전하 외의 나머지 전하를 계로 묶어 생각하게 되므로 상황이 단순해지고, 한 전하가 받는 전기력이 조건으로 제시되는 경우가 많으므로 이를 직접 이용하기 수월하다.

성질

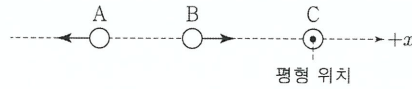
- ① $F_A + F_B + F_C = 0$ 이다.
- ② $F_A = 0$ 이고 $F_B = 0$ 이면 $F_C = 0$ 이다.
- ③ F_A 와 F_B 의 방향이 같으면 F_C 의 크기는 $(F_A$ 나 F_B 보다) 더 크고, 방향은 $(F_A$ 나 F_B 와) 반대이다.

성질 ①에서 $F_A = F_{BA} + F_{CA}$ 로 둔 것이고 F_B, F_C 도 마찬가지이다. 이는 작용 반작용 관계에 있는 힘을 더하면 0이 된다는 사실로부터 쉽게 알 수 있다. 성질 ②와 성질 ③은 성질 ①의 특수한 경우로, 가끔 이를 주요 발상으로 하는 문제가 출제될 때가 있다. 전기력이 0인 조건은 고정하지 않았는데 정지해 있다는 조건이 제시되는 등 다른 방식으로 주어질 때도 있다.

전기력의 작용 반작용 성질은 전기력 변화량을 이용한 문제를 풀 때도 마찬가지로 적용할 수 있다. $F_A + F_B + F_C = 0 \rightarrow \Delta F_A + \Delta F_B + \Delta F_C = 0$ 으로 바꾸어 쓸 수 있기 때문이다.

■ 평형 위치

셋 이상의 점전하가 있을 때 어떤 점전하가 받는 전기력이 0인 경우, 그 물체가 **평형 위치**에 있다고 생각할 수 있다. 이는 나머지 두 점전하에 의한 전기장이 0인 위치를 뜻한다.



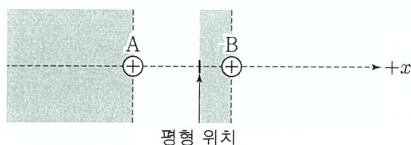
평형 위치에는 많은 성질이 있는데, 모두 문제 풀이에 자주 이용되므로 잘 알아두어야 한다.

성질

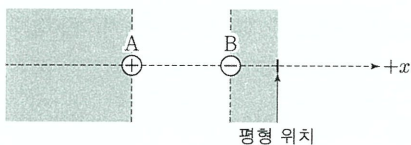
- ① 평형 위치에 있는 점전하를 전하량이 다른 점전하로 바꾸어도, 받는 전기력은 0이다.
- ② 두 점전하의 위치나 전하량을 바꾸면 평형 위치가 이동한다.
- ③ 두 점전하에 의한 평형 위치가 사잇 구간에 있으면, 두 점전하의 종류(부호)가 같다.
- ④ 두 점전하에 의한 평형 위치가 바깥 구간에 있으면, 두 점전하의 종류(부호)가 다르다.
- ⑤ 두 점전하에 의한 평형 위치는 전하량의 크기가 작은 쪽에 가까이 있다.
- ⑥ (사이에 다른 전하가 없는) 두 점에서 점전하가 받는 전기력의 방향이 서로 다르면, 두 점 사이에 평형 위치가 있다.

성질 ①은 “평형 위치에 있는 점전하가 받는 전기력은 그 점전하의 전하의 종류와 전하량의 크기에 무관하다”는 의미이다. 성질 ③과 ④는 두 점전하에 의한 전기력의 상쇄가 일어나는 구간이 안쪽인지 바깥쪽인지를 뜻한다. 성질 ⑤는 각 점전하의 전하량의 크기는 평형 위치로부터의 거리 제곱에 비례한다는 정량적 공식으로 표현할 수 있다. 즉, $Q \propto r^2$ 이다.

문제에 주어진 조건이나 성질 ③~⑤로부터 평형 위치를 구했다면 평형 위치에 있지 않을 때의 전기력 방향을 쉽게 구할 수 있다. 평형 위치는 두 점전하로부터의 영향력이 서로 같은 지점이다. 평형 위치에 있지 않다는 것은 둘 중 한 전하의 영향력이 더 큰 위치에 있다는 의미이기 때문이다. 즉, 평형 위치에 있을 때와 비교하여 어느 쪽 전하와 작용하는 전기력의 세기가 더 커졌는지를 비교하면 전기력의 방향을 쉽게 구할 수 있다. 성질 ⑥은 다른 조건으로부터 평형 위치를 유추하는 방법에 관한 것이다. 이를 이용하여 평형 위치를 정성적으로 구하여 다른 성질을 순차 적용하면 된다.



위 그림은 평형 위치가 A와 B의 사잇 구간에 있으므로 A와 B의 전하의 종류는 같다. 평형 위치가 B에 더 가까우므로 전하량의 크기는 B가 A보다 작다. 만일 A와 B의 전하량의 크기가 같다면 평형 위치는 중점이 된다.



아래 그림은 평형 위치가 A와 B의 바깥 구간에 있으므로 A와 B의 전하의 종류는 다르다. 평형 위치가 B에 더 가까우므로 전하량의 크기는 B가 A보다 작다. 만일 A와 B의 전하량의 크기가 같다면 평형 위치는 존재하지 않는다.

예제 40

x 축상의 점전하 A, B, C가 각각 $x=0$, $x=d$, $x=3d$ 에 고정되어 있다. A는 양(+)전하이므로 A에 작용하는 전기력은 0이다. 양(+)전하를 띤 점전하 D를 $x=2d$ 에 고정시켰을 때, D에 작용하는 전기력은 0이다. A, B, C의 전하량의 크기의 비는?

해설

- ① B와 C가 A에 작용하는 전기력의 방향이 서로 반대이므로, 전하의 종류는 서로 다르다.
- ② B와 C가 A에 작용하는 전기력의 합력이 0이므로, 전하량의 크기는 C가 B의 $\frac{(3d)^2}{d^2}=9$ 배이다.
- ③ D를 $x=2d$ 에 고정시켰을 때 A가 D에 작용하는 전기력의 방향은 $+x$ 방향이므로 전기력의 합력이 0이려면 B와 C가 D에 작용하는 전기력의 방향은 $-x$ 방향이다. B와 C의 전하의 종류는 서로 다르므로 사잇 구간에서는 전기력이 보장된다. 따라서 B와 C는 각각 음(-)전하, 양(+)전하이므로.
- ④ $x=2d$ 로부터의 거리 제곱의 비가 $(2d)^2 : d^2 : d^2 = 4 : 1 : 1$ 이므로, 세 점전하 A, B, C의 전하량의 크기의 비는 $4 \times (1+9) : 1 : 9 = 40 : 1 : 9$ 이다.

예제 41

x 축상의 점전하 A, B, C가 각각 $x=0$, $x=2d$, $x=3d$ 에 가만히 정지해 있다. A는 양(+)전하이므로 A에 작용하는 전기력은 0이다. C에 작용하는 전기력도 0이다. A와 B 사이에 작용하는 전기력의 크기가 F 일 때, B가 C에 작용하는 전기력의 크기와 방향은?

해설

- ① A에 작용하는 전기력이 0이고 C에 작용하는 전기력이 0이므로, B에 작용하는 전기력도 0이다.
- ② A가 양(+)전하이므로 B의 위치가 평형 위치이려면 C도 양(+)전하이므로, 전기력의 크기가 같을 때 전하량의 크기의 비는 거리 제곱의 비이므로 $Q_A : Q_C = (2d)^2 : (3d-2d)^2 = 4 : 1$ 이다.
- ③ A가 양(+)전하이므로 C의 위치가 평형 위치이려면 B는 음(-)전하이므로, $Q_A : Q_B = (3d)^2 : (3d-2d)^2 = 9 : 1$ 이다.
- ④ A, B 사이와 B, C 사이의 거리 제곱의 비는 $4 : 1$ 이고 전하량의 크기 비 $Q_A : Q_B : Q_C = 1 : \frac{1}{9} : \frac{1}{4} = 36 : 4 : 9$ 이므로 B가 C에 작용하는 전기력의 크기는 $F \times \frac{9}{36} \times 4 = F$ 이고, 방향은 $-x$ 방향이다.

예제 42

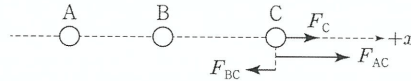
x 축상의 점전하 A, B, C가 각각 $x=0$, $x=2d$, $x=3d$ 에 고정되어 있다. C는 음(-)전하이므로 C에 작용하는 전기력은 0이다. B를 $x=d$ 로 옮겨 고정하면 B에 작용하는 전기력은 0이 되고 C에는 $+x$ 방향으로 크기가 F 인 전기력이 작용한다. C가 A에 작용하는 전기력의 방향과 크기는?

해설

- ① $x_B = 2d$ 일 때 평형 위치가 $x=3d$ 이므로 A와 B는 서로 다른 종류의 전하이므로 전하량의 크기의 비는 $9 : 1$ 이다.
- ② $x_B = d$ 일 때 평형 위치가 $x=d$ 이므로 A와 C는 모두 음(-)전하이므로 전하량의 크기의 비는 $1 : 4$ 이다.
- ③ 따라서 A, B, C의 전하량의 크기의 비는 $9 : 1 : 36$ 이고, 부호는 각각 음(-), 양(+), 음(-)이다.
- ④ $x_B = d$ 일 때 A에 작용하는 전기력은 전체 합력으로부터 $-(0+F) = -F$ 이다. B가 A에 작용하는 전기력의 크기와 C가 A에 작용하는 전기력의 크기 비는 $9 : 36 = 1 : 4$ 이고 방향이 각각 $+x$ 방향, $-x$ 방향이므로 전기력은 각각 $+\frac{1}{3}F$, $-\frac{4}{3}F$ 이다. ($+x$ 방향이 양) 따라서 C가 A에 작용하는 전기력의 방향은 $-x$ 방향이고, 크기는 $\frac{4}{3}F$ 이다.

■ 전기력 합력

전기력의 합력은 보통의 힘처럼 단순히 정량적으로 더하여 계산하는 경우도 있지만, 그보다 정성적인 대소 비교를 통해 합력의 크기와 방향을 대략적으로 가늠하는 경우가 더 많다. 정량 계산이 불가능하도록 조건이 주어져 있거나, 비교만 하기 위해 필요한 계산이 지나치게 복잡할 때가 많기 때문이다.



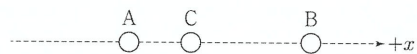
두 점전하 A와 B가 점전하 C에 서로 방향이 다른 전기력을 작용하여, C에는 상쇄된 합력이 작용하는 상황을 가정하자. (C를 기준으로) A와 B가 같은 방향에 있다면 A와 B는 서로 다른 종류(부호)의 전하이므로, A와 B가 다른 방향에 있다면 A와 B는 서로 같은 종류(부호)의 전하이다. 이때, A나 B가 “C에 작용하는 전기력”에는 다음 성질이 성립한다.

성질

- ① A의 전기력의 크기가 B의 전기력의 크기보다 크다면, 전기력 합력의 방향은 A를 따라간다.
- ② 전기력 합력의 방향이 A에 의한 전기력의 방향과 같으면, 전기력의 크기는 A가 B보다 크다. 전기력 합력의 방향이 A에 의한 전기력의 방향과 반대이면, 전기력의 크기는 A가 B보다 작다.
- ③ C로부터의 거리가 더 먼데, 전기력의 크기가 크거나 같은 쪽의 전하의 전하량의 크기가 더 크다.

필요로 하지만, 합력의 방향은 전기력의 크기 비교만으로 구할 수 있다. 성질 ②는 역으로 작용하는 전기력의 크기가 더 큰 전하가 어느 것인지 알고 싶을 때 이용한다. 성질 ③은 영향력 비교로부터 전하량의 크기 비교를 수행할 때 유용하다. 전기력, 거리, 전하량 사이의 관계를 정량적으로 계산할 수 없는 상황에서는 일반적으로 시도해볼 수 있는 다른 방법이 별로 없기 때문이다. 위 세 성질은 전기력의 합력으로부터 개별 점전하가 작용하는 전기력을 비교하고, 궁극적으로 전하량의 크기를 비교하는 데 목적이 있다.

개별 점전하의 부호를 비교하는 경우에는 전기력의 합력의 **보강-상쇄** 여부를 파악하는 방법이 있다. 두 점전하 A와 B를 고정시켜두고, 점전하 C를 사잇 구간과 바깥 구간에 번갈아 놓는 상황을 가정해보자. 예를 들어 아래 두 그림과 같이 C를 구간 AB의 바깥쪽에 두었다가, AB의 안쪽에 두는 식으로 위치를 바꾸었다고 하자.



성질

- ① 전기력이 보강될 때는 합력의 크기가 “둘 중 큰 전기력”보다 더 크고, 전기력이 상쇄될 때는 합력의 크기가 “둘 중 큰 전기력”보다 더 작다.
- ② C에 작용하는 전기력의 방향이 바깥 구간에서와 사잇 구간에서가 서로 같으면, 보강된 전기력 방향과 상쇄된 전기력 방향이 같은 상황이다.

성질 ②는 **보강-상쇄**의 관점에서 서술한 것으로, **영향력**의 관점에서 서술하면 “상쇄될 때에 B의 영향력이 더 크다”가 된다. 주의할 점은 위 성질에서 문제 상황에 제시된 위치를 표현하는 방법으로 구간을 이용한 것이지, 사잇 구간이나 바깥 구간의 임의의 위치에서 성립한다는 의미는 아니라는 것이다.

성질

- ① A와 B의 전하의 종류(부호)가 같고 C가 바깥 구간에 있을 때, C가 받는 전기력은 보강된다.
- ② A와 B의 전하의 종류(부호)가 다르고 C가 사잇 구간에 있을 때, C가 받는 전기력은 보강된다.
- ③ A와 B의 전하의 종류(부호)가 같고 C가 사잇 구간에 있을 때, C가 받는 전기력은 상쇄된다.
- ④ A와 B의 전하의 종류(부호)가 다르고 C가 바깥 구간에 있을 때, C가 받는 전기력은 상쇄된다.

예제 43

x 축상의 점전하 A, B가 각각 $x=d$, $x=4d$ 에 고정되어 있다. 점전하 C를 $x=0$, $x=2d$ 에 고정시켰을 때 C가 받는 전기력의 방향은 각각 $-x$ 방향, $+x$ 방향이고 전기력의 크기는 각각 F_1 , F_2 이다. C를 $x=3d$ 에 고정시켰을 때 C가 받는 전기력은 0이다. $F_1:F_2$ 는?

해설

- ① 평형 위치가 사잇 구간($d < x < 4d$)에 있으므로 A와 B의 전하의 종류는 같다.
- ② 점전하 C의 전하를 양(+)으로 두자. C를 $x=0$ 에 고정시켰을 때 C가 받는 전기력은 보강되었고 $-x$ 방향이므로, A와 B는 C와 같은 양(+)전하이다. (모두 음(-)전하로 두고 풀어도 결과는 동일함)
- ③ 평형 위치로부터 A와 B의 거리 제곱의 비가 4:1이므로 전하량의 크기 비도 4:1이다.
- ④ C를 $x=0$ 에 고정시켰을 때 받는 전기력은 보강되고, $x=2d$ 에 고정시켰을 때 전기력은 상쇄된다. 따라서 전기력의 크기 비는 $F_1:F_2 = \left(4 + \frac{1}{4^2}\right) : \left(4 - \frac{1}{2^2}\right) = 65:60 = 13:12$ 이다.

위 예시에서 얻을 수 있는 성질을 정리해보자.

성질

- ① 조건에서 전하의 부호가 직접 주어진 것이 없는 경우, 부호를 배정할 수 있는 방법이 항상 2가지다. 따라서 원하는 대로 기준이 되는 점전하를 정하여 부호를 정해두고 문제를 풀 수 있다.
- ② 한 점전하로부터 같은 거리만큼 떨어진 두 점에서 두 점전하에 의한 전기력의 크기를 계산할 때, 보강되는 경우는 전기력의 합을, 상쇄되는 경우는 전기력의 차를 계산한다.

예제 44

x 축상의 점전하 A, B가 각각 $x=0$, $x=2d$ 에 고정되어 있다. 음(-)전하를 띤 점전하 C를 각각 $x=d$, $x=3d$ 에 고정시켰을 때 C가 받은 전기력의 방향은 $-x$ 방향으로 같고, 크기는 F 로 같다. A와 B의 전하량의 크기의 비는?

해설

- ① B가 음(-)전하라고 가정하자. B가 C에 작용하는 전기력의 방향은 C의 위치가 $x=d$ 일 때 $-x$ 방향, $x=3d$ 일 때 $+x$ 방향이므로, A가 C에 작용하는 전기력의 방향이 $-x$ 방향이어야 한다. 그러면 사잇 구간($x=d$)에서 C에 작용하는 전기력의 보강, 바깥 구간($x=3d$)에서 상쇄가 일어난다.
- ② A의 영향력은 $x=0$ 에서가 $x=2d$ 에서보다 더 크므로, 보강될 때의 전기력 크기가 상쇄될 때의 전기력 크기보다 크다. 따라서 전기력의 크기가 F 로 같다는 조건에 모순이다.
- ③ B는 양(+)전하이다. 그러면 B가 C에 작용하는 전기력의 방향은 C의 위치가 $x=d$ 일 때 $+x$ 방향, $x=3d$ 일 때 $-x$ 방향이므로, ①에서와 같이 A가 C에 작용하는 전기력의 방향이 $-x$ 방향이어야 한다. 그러면 사잇 구간에서 C에 작용하는 전기력의 상쇄, 바깥 구간에서 보강이 일어난다.
- ④ A는 C와 인력이 작용하므로 양(+)전하이다.
- ⑤ A와 B가 거리 d 만큼 떨어진 C에 작용하는 힘의 크기를 각각 F_A , F_B 로 두자. C가 $x=d$ 에 위치할 때와 $x=3d$ 에 위치할 때 C에 작용하는 전기력이 같으므로, $F_A - F_B = \frac{1}{9}F_A + F_B$, $4F_A = 9F_B$ 이다.
- ⑥ A와 B의 전하량의 크기를 각각 Q_A , Q_B 라 두면 전하량의 크기의 비 $Q_A : Q_B = F_A : F_B = 9 : 4$ 이다.

위 예시에서 얻을 수 있는 성질을 정리해보자.

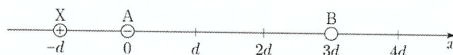
성질

- ① (두 점전하 중) 한 점전하로부터 같은 거리만큼 떨어진 두 점에서 두 점전하에 의한 전기력의 크기를 비교할 때, 사잇 구간에서 보강이 일어난다면 전기력의 크기는 사잇 구간에서가 더 크다.
- ② (두 점전하 중) 한 점전하로부터 같은 거리만큼 떨어진 두 점에서 두 점전하에 의한 전기력의 크기를 비교할 때, 사잇 구간에서 더 작거나 같다면 사잇 구간에서 상쇄가 일어난다.
- ③ 두 점전하의 전하량의 크기 비는 같은 거리에서 시험 전하에 작용하는 전기력의 크기 비와 같다.

예제 45

■ 2020학년도 6월 모의평가 물리 I 14번

그림과 같이 점전하 A, B가 각각 $x=0$, $x=3d$ 에 고정되어 있다. A는 음(-)전하이다. 양(+)전하를 띤 입자 X의 위치를 바꾸어가며 X에 작용하는 전기력의 크기를 측정하였더니, $x=-d$, $x=d$, $x=4d$ 에서 각각 F_1 , F_2 , F_3 이었다.



$F_2 > F_3 > F_1$ 일 때, 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오.

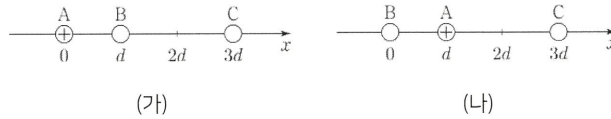
| 보기 |

- ㄱ. 전하량의 크기는 B가 A보다 크다.
- ㄴ. $x=d$ 와 $x=2d$ 사이에 X에 작용하는 전기력이 0이 되는 지점이 있다.
- ㄷ. $x=-d$ 에서 X에 작용하는 전기력의 방향은 $-x$ 방향이다.

예제 46

■ 2022학년도 6월 모의평가 물리학 I 19번

그림 (가)는 x 축상에 고정된 점전하 A, B, C를 나타낸 것으로 B에 작용하는 전기력의 방향은 $+x$ 방향이고, C에 작용하는 전기력은 0이다. 그림 (나)는 (가)에서 A, B의 위치만 바꾸어 고정시킨 것을 나타낸 것이다. A는 양(+)전하이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오.

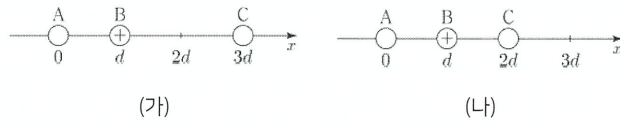
| 보기 |

- ㄱ. 전하량의 크기는 B가 C보다 작다.
- ㄴ. A에 작용하는 전기력의 방향은 (가)에서와 (나)에서가 같다.
- ㄷ. (나)에서 A에 작용하는 전기력의 크기는 B에 작용하는 전기력의 크기보다 크다.

예제 47

■ 2022학년도 9월 모의평가 물리학 I 19번

그림 (가)는 점전하 A, B, C를 x 축상에 고정시킨 것으로 C에 작용하는 전기력의 방향은 $+x$ 방향이다. 그림 (나)는 (가)에서 C의 위치만 $x=2d$ 로 바꾸어 고정시킨 것으로 A에 작용하는 전기력의 크기는 0이고, C에 작용하는 전기력의 방향은 $-x$ 방향이다. B는 양(+)전하이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오.

| 보기 |

- ㄱ. A는 음(-)전하이다.
- ㄴ. 전하량의 크기는 A가 C보다 크다.
- ㄷ. B에 작용하는 전기력의 방향은 (가)에서와 (나)에서가 같다.

■ 전기력 변화량

아래 두 그림은 전하 A와 B가 있을 때 A를 고정해두고 B의 위치를 옮기는 상황을 나타낸 것이다. 두 경우에서 처음에 A와 B 사이의 거리는 x 이고, A와 B 사이에 작용하는 전기력 크기는 F 이다.



왼쪽 그림에서는 A와 B 사이의 거리만 $x \rightarrow 2x$ 로 증가하고 작용하는 각 전기력 방향은 바뀌지 않는다. 오른쪽 그림에서는 A와 B 사이의 거리가 $x \rightarrow 2x$ 로 증가하고, 작용하는 각 전기력의 방향이 바뀐다. 거리 제곱은 4배 증가한 것이므로 전기력의 크기는 $\frac{1}{4}F$ 가 된다.

만일 A에 작용하는 전기력 변화량을 구한다면, 왼쪽 그림에서는 $\Delta F = -\frac{1}{4}F - (-F) = \frac{3}{4}F$ 이고 오른쪽 그림에서는 $\Delta F = \frac{1}{4}F - (-F) = \frac{5}{4}F$ 이다. (오른쪽 방향을 양(+)으로 둠)

변화량을 계산할 때 이처럼 각 상황에서의 전기력을 쿨롱 법칙에 따라 구하고, 나중 물리량에서 처음 물리량을 빼주어도 되지만 종종 이런 계산이 헛갈릴 때가 있다. **변화량** 풀이에 익숙하지 않다면 (왼쪽 그림) 다음과 같이 생각해보자.

- [1] 점전하 B의 위치를 x 에서 $2x$ 로 바꾼다는 것은 $2x$ 에 B가 하나 생기고 x 에 있던 B가 없어진다는 것과 같다.
- [2] x 에 B가 없어지는 대신 $(0-x)$ 에 B가 하나 생긴다고 생각해보자.
- [3] 전기력 변화량은, 새로 생긴 두 B에 의한 전기력 합력과 같다. 따라서 $2x$ 에 놓인 B에 의한 전기력 $-\frac{1}{4}F$ 와 $-x$ 에 놓인 B에 의한 전기력 F 를 더하여 $\Delta F = -\frac{1}{4}F + F = \frac{3}{4}F$ 이다.

마찬가지로 (오른쪽 그림) 점전하 B의 위치가 x 에서 $-2x$ 로 변화했을 때 A에 작용하는 전기력 변화량 ΔF 는, B가 $-2x$ 와 $-x$ 에 위치할 때 A에 작용하는 전기력 합력 $\frac{1}{4}F + F = \frac{5}{4}F$ 와 같다.

성질

전기력 변화량은 나중 위치에서의 전기력과 처음 위치의 대칭점에서의 전기력의 합력과 같다.

예제 48

x 축상의 점전하 A, B, C가 각각 $x=0$, $x=d$, $x=2d$ 에 고정되어 있다. B와 C는 양(+)전하이므로 전하량의 크기는 같다. B와 C는 $+x$ 방향으로 크기가 F 인 전기력을 받는다. B를 $x=3d$ 로 옮겼을 때, C가 받는 전기력의 크기와 방향은?

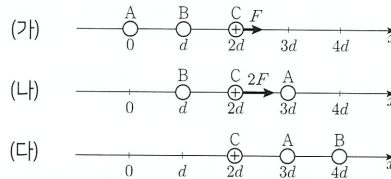
해설

- ① 모든 전하가 받는 전기력의 합력은 0이므로 $F_A + F + F = 0$, $F_A = -2F$ 이다. 즉, A는 $-x$ 방향으로 크기가 $2F$ 인 전기력을 받는다. ($+x$ 방향이 양) 따라서 A는 양(+)전하임을 알 수 있다.
- ② B와 C의 전하는 동일하고 A와의 거리 제곱의 비는 $1:4$ 이므로, A와 B 사이의 척력(F_{AB})의 크기는 $\frac{8}{5}F$, A와 C 사이의 척력(F_{AC})의 크기는 $\frac{2}{5}F$ 이다.
- ③ $F_B = F_C = F$ 이므로 $F_B = \frac{8}{5}F - F_{BC}$ 또는 $F_C = \frac{3}{5}F + F_{BC}$ 로부터 B와 C 사이의 척력(F_{BC})의 크기는 $\frac{3}{5}F$ 이다.
- ④ B를 $x=d$ 에서 $x=3d$ 로 옮겼을 때 $x=2d$ 에 위치한 C에 작용하는 전기력의 변화량은, $x=3d$ 에 B를 2개 놓았을 때 이 두 B가 C에 작용하는 전기력의 합력(B 하나가 작용하는 전기력의 2배)과 같다.
- ⑤ 따라서 B를 $x=3d$ 로 옮겼을 때, C가 받는 전기력의 변화량은 $2 \times \left(-\frac{3}{5}F\right) = -\frac{6}{5}F$ 이므로, 받는 전기력은 $F - \frac{6}{5}F = -\frac{1}{5}F$ 이다. 정리하면 C는 $-x$ 방향으로 크기가 $\frac{1}{5}F$ 인 전기력을 받는다.

예제 49

■ 2021학년도 9월 모의평가 물리학 I 19번

그림 (가), (나), (다)는 점전하 A, B, C가 x 축 상에 고정되어 있는 세 가지 상황을 나타낸 것이다. (가)에서는 양(+)전하인 C에 $+x$ 방향으로 크기가 F 인 전기력이, A에는 크기가 $2F$ 인 전기력이 작용한다. (나)에서는 C에 $+x$ 방향으로 크기가 $2F$ 인 전기력이 작용한다.

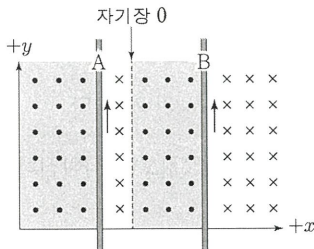


(다)에서 A에 작용하는 전기력의 크기와 방향은?

[2] 전류와 자기장

■ 자기장 구간

전류가 흐르는 도선 2개가 x 축에 수직으로 (= y 축에 나란하게) 고정된 경우, xy 평면에 수직으로 들어가거나 xy 평면에서 수직으로 나오는 자기장의 방향을 **기준**으로 하고, 도선이 놓인 직선과 자기장이 0인 직선을 **경계**로 하여 자기장 영역을 3~4개의 구간으로 나눌 수 있다.



왼쪽 그림은 고정된 도선 A, B에 의한 자기장 영역을 네 구간으로 나타낸 것으로, 자기력이 같은 방향인 영역을 같은 색으로 표시한 것이다. A와 B에 흐르는 전류의 방향은 모두 $+y$ 방향이다.

자기장이 0인 위치는 x 축 위의 지점, 혹은 그 점을 지나고 x 축에 수직인 직선으로 나타낼 수 있다. 이 점은 전기력의 평형 위치에 대응된다. 그림에서는 자기장이 0인 점이 A에 가까이 있으므로, 전류의 세기는 B가 A보다 크다. 이는 전기력의 **평형 위치**에 관한 성질에서 다루었던 내용과 유사하다. 실제로 자기장의 **경계**에 관한 성질 대부분은 앞에서 다룬 성질과 유사하다.

성질

- ① 도선의 위치나 전류를 바꾸면 자기장이 0인 점이 이동한다.
- ② 두 도선에 의한 자기장이 0인 점이 사잇 구간에 있으면, 두 도선에 흐르는 전류의 방향이 같다.
- ③ 두 도선에 의한 자기장이 0인 점이 바깥 구간에 있으면, 두 도선에 흐르는 전류의 방향이 다르다.
- ④ 두 도선에 의한 자기장이 0인 점은 전류의 세기가 작은 쪽에 가까이 있다.
- ⑤ (사이에 다른 도선이 없는) 두 점에서 자기장의 방향이 서로 다르면, 두 점 사이에 자기장이 0인 점이 있다.

성질 ①~⑤을 살펴보면 자기장의 **경계**의 성질이 전기력의 **평형 위치**의 성질과 유사하다는 사실을 알 수 있다. 공식의 꼴이 비슷하기 때문에 거리에 반비례하냐, 거리 제곱에 반비례하냐 정도만 다르고 정성적 성질은 결이 같게 된다. 다만 전기력과 자기장은 각각 점에 관한 개념, 공간에 관한 개념이기 때문에 문제화되는 상황이 조금 다르고 비중도 조금 다르다.

예를 들어 전기력은 작용 반작용 법칙을 이용하는 주제를 출제하든, 자기장은 한없이 가깝거나 한없이 먼 지점의 자기장을 이용하는 주제를 출제하든 할 수 있다. 후자로부터 얻을 수 있는 자기장 방향을 얻는 데 도움이 되는 성질은 다음과 같다.

성질

- ① 각 구간은 반드시 인접한 구간과 자기장의 방향이 반대이다.
- ② 도선에 한없이 가까운 점에서의 자기장 방향은, 그 도선에 의한 자기장만 고려한 방향과 같다.

성질 ①과 ②를 이용하면 각 구간에서의 자기장 방향을 빠르게 구하거나, 빠르게 가정하여 모순을 찾을 수 있다.

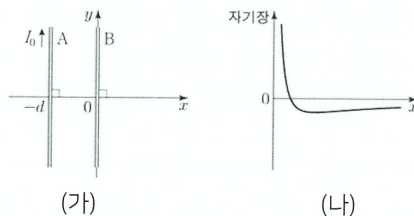
이외에도 자기장 테마에서는 전기력 테마에서 다루었던 **영향력** 논리나 **보강-상쇄** 논리도 똑같이 적용된다.

주요 논리	전기력	자기장
평형 위치 / 경계	① 평형 위치(경계)가 사잇 구간에 있으면 전하의 부호(전류의 방향)가 서로 같다. 평형 위치(경계)가 바깥 구간에 있으면 전하의 부호(전류의 방향)가 서로 다르다. ② 평형 위치(경계)가 가까운 쪽이 전하량의 크기(전류의 세기)가 작다. 평형 위치(경계)로부터 먼 쪽이 전하량의 크기(전류의 세기)가 크다.	
영향력	① 전기력 합력(합성 자기장)은 영향력이 더 큰 쪽의 방향을 따라간다. ② 거리가 먼데 동일하거나 큰 영향력을 행사하면, 전하량의 크기(전류의 세기)가 크다.	
보강-상쇄	① 전기력 합력(합성 자기장)은 보강되면 최댓값보다 커지고, 상쇄되면 최댓값보다 작아진다. ② 평형 위치(경계)는 상쇄되는 구간에 있다. ③ 전하의 부호(전류의 방향)가 같으면 바깥 구간에서 보강, 사잇 구간에서 상쇄된다. ④ 전하의 부호(전류의 방향)가 다르면 바깥 구간에서 상쇄, 사잇 구간에서 보강된다.	

예제 50

■ 2020학년도 대학수학능력시험 물리 I 13번

그림 (가)와 같이 전류가 흐르는 무한히 긴 직선 도선 A, B가 xy 평면의 $x = -d$, $x=0$ 에 각각 고정되어 있다. A에는 세기가 I_0 인 전류가 $+y$ 방향으로 흐른다. 그림 (나)는 $x > 0$ 영역에서 A, B에 흐르는 전류에 의한 자기장을 x 에 따라 나타낸 것이다. 자기장의 방향은 xy 평면에서 수직으로 나오는 방향이 양(+)이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오.

| 보기 |

- ㄱ. B에 흐르는 전류의 방향은 $-y$ 방향이다.
 ㄴ. B에 흐르는 전류의 세기는 I_0 보다 크다.
 ㄷ. A, B에 흐르는 전류에 의한 자기장의 방향은 $x = -\frac{1}{2}d$ 에서와 $x = -\frac{3}{2}d$ 에서가 같다.

성질

xy 평면의 한 직선 l 상에서 위치에 따른 자기장의 차에 대하여 다음이 성립한다.

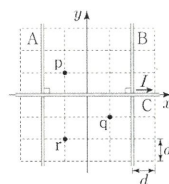
- ① l 에 수직인 모든 도선에 흐르는 전류에 의한 자기장의 차와 같다.
- ② l 에 나란한 임의의 도선에 흐르는 전류에 의한 자기장의 차는 0이다.

성질 ①과 ②는 같은 내용을 다르게 풀어 쓴 것이지만, 둘 다 기억해두는 것이 좋다. 핵심은 (두 점을 비교하였을 때) 거리가 일정하다면 자기장의 차가 0이라는 것이고, 따라서 거리가 일정한 도선에 흐르는 전류에 의한 자기장은 무시하고 계산하면 된다는 점이다.

예제 51

■ 2020학년도 9월 모의평가 물리 I 14번

그림과 같이 전류가 흐르는 무한히 긴 직선 도선 A, B, C가 xy 평면에 고정되어 있고, C에는 세기가 I 인 전류가 $+x$ 방향으로 흐른다. 점 p, q, r는 xy 평면에 있고, p, q에서 A, B, C에 흐르는 전류에 의한 자기장은 0이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오.

| 보기 |

- ㄱ. 전류의 방향은 A에서와 B에서가 같다.
- ㄴ. A에 흐르는 전류의 세기는 I 보다 작다.
- ㄷ. r에서 A, B, C에 흐르는 전류에 의한 자기장의 방향은 xy 평면에서 수직으로 나오는 방향이다.

■ 자기장 중첩

한 점에서 (둘 이상의 도선에 흐르는 전류에 의한) 합성 자기장을 계산할 때, 각 도선에 흐르는 전류에 의한 자기장이 변하는 경우, 각 자기장을 독립적으로 고려하여 최종 합산한다.

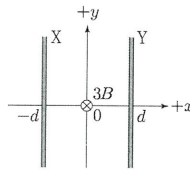
성질

- ① 도선 A에 흐르는 전류가 I 이고 점 p에서의 자기장이 B 일 때, 도선 A에 흐르는 전류가 cI 가 되면 p에서의 자기장이 cB 가 된다. 또는 $f(I)=B$ 이면 $f(cI)=cf(I)$ 이다.
- ② 도선 A와 B에 흐르는 전류가 각각 I_A, I_B 이고 점 p에 만드는 자기장이 각각 B_A, B_B 일 때, 점 p에서의 합성 자기장은 $B_A + B_B$ 이다. 또는 $f(I_A)=B_A$ 이고 $f(I_B)=B_B$ 일 때, $f(I_A + I_B)=f(I_A)+f(I_B)$ 이다.

성질 ①은 전류의 세기가 2배가 되면 자기장의 세기도 2배가 되고, 전류의 방향이 바뀌면 자기장의 방향도 바뀐다고 이해할 수 있다. 성질 ②는 합성 자기장은 각 도선에 의한 자기장을 단순히 합하여 구할 수 있다는 의미이다. 당연해 보이는 두 성질이 **중첩**을 이용한 문제 풀이의 바탕이 된다. 예시를 통해 중첩을 이용해 문제를 푸는 방법을 알아보자.

예제 54

그림은 종이면에서 도선 X와 Y가 원점으로부터 같은 거리만큼 떨어져 y축에 나란하게 고정되어 있는 모습을 나타낸 것이다. 원점에서 자기장의 방향은 종이면으로 들어가는 방향이고, 자기장의 세기는 $3B$ 이다. X에 흐르는 전류의 방향을 거꾸로 하면 원점에서 자기장의 방향은 종이면에서 나오는 방향이 되고, 자기장의 세기는 B 가 된다.



X와 Y에 흐르는 전류의 방향과 세기의 비는?

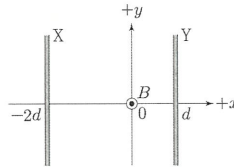
해설

- ① 처음 상황을 $(I_X, I_Y) = +3B$ 라 하고, 나중 상황을 $(-I_X, I_Y) = -B$ 라 하자. (종이면에 들어가는 방향이 양(+))
- ② $\frac{(I_X, I_Y) + (-I_X, I_Y)}{2} = (0, I_Y) = +B$ 이다. (평균에 해당하는 상황)
- ③ $(I_X, I_Y) - (0, I_Y) = (I_X, 0) = +2B$ 이므로, $I_X : I_Y = 2B : B$ 이다. (변화량에 해당하는 상황)
- ④ 따라서 X와 Y에 흐르는 전류의 방향은 각각 $+y$ 방향, $-y$ 방향이고, 전류의 세기의 비는 $2:1$ 이다.

중첩의 핵심은 [문제 상황]과 [정량 수식]을 자유롭게 오가는 것이다. 반드시 문제에 명시적으로 주어진 상황을 수식화 해서 미지수를 찾는 식으로만 풀 필요가 없다. 문제에 주어지지 않은 문제 상황도 얼마든지 가정할 수 있고, 수식으로 표현할 수 있다. 거꾸로 평균이나 변화량으로부터 구한 새로운 수식을 새로운 상황이라는 관점에서 살펴볼 수도 있다.

예제 55

그림은 종이면에서 도선 X와 Y가 원점으로부터 각각 $2d$, d 만큼 떨어져 y 축에 나란하게 고정되어 있는 모습을 나타낸 것이다. 원점에서 자기장의 방향은 종이면에서 나오는 방향이고, 자기장의 세기는 B 이다. X에 흐르는 전류의 세기를 2배로 하면, 원점에서 자기장의 방향은 일정하고, 자기장의 세기는 $3B$ 가 된다.



X와 Y에 흐르는 전류의 방향과 세기의 비는?

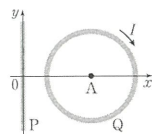
해설

- ① 처음 상황을 $(0.5I_X, I_Y) = +B$ 라 하고, 나중 상황을 $(I_X, I_Y) = +3B$ 라 하자. (종이면에서 나오는 방향이 양(+))
- ② $(I_X, I_Y) - (0.5I_X, I_Y) = (0.5I_X, 0) = +2B$ 이다. (변화량에 해당하는 상황)
- ③ $(0.5I_X, I_Y) - (0.5I_X, 0) = (0, I_Y) = -B$ 이므로, $I_X : I_Y = 4B : -B$ 이다. (변화량에 해당하는 상황)
- ④ 따라서 X와 Y에 흐르는 전류의 방향은 $-y$ 방향으로 같고, 전류의 세기의 비는 $4:1$ 이다.

예제 56

■ 2018학년도 6월 모의평가 물리 I 6번

그림은 무한히 긴 직선 도선 P가 y 축에 고정되어 있고, 시계 방향으로 일정한 세기의 전류 I 가 흐르는 원형 도선 Q가 xy 평면에 고정되어 있는 것을 나타낸 것이다. 점 A는 Q의 중심이다. 표는 P에 흐르는 전류에 따른 A에서의 P와 Q에 의한 자기장을 나타낸 것이다.



P에 흐르는 전류		A에서의 P와 Q에 의한 자기장	
세기	방향	세기	방향
I_0	⊙	0	없음
I_0	$+y$	B_0	⊙
$2I_0$	$-y$	⊖	⊖

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오.

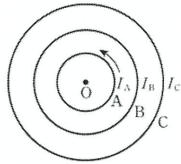
| 보기 |

- ㄱ. ⊙은 $-y$ 이다.
- ㄴ. ⊙과 ⊖은 같다.
- ㄷ. ⊖은 B_0 보다 크다.

예제 57

■ 2019학년도 6월 모의평가 물리 I 14번

그림과 같이 중심이 점 O인 세 원형 도선 A, B, C가 종이면에 고정되어 있다. 표는 O에서 A, B, C의 전류에 의한 자기장의 세기와 방향을 나타낸 것이다. A에 흐르는 전류의 방향은 시계 반대 방향이다.



실험	전류의 세기			O에서의 자기장	
	A	B	C	세기	방향
I	I_A	0	0	B_0	$\ominus$
II	I_A	I_B	0	$0.5B_0$	$\times$
III	I_A	I_B	I_C	B_0	$\odot$

$\times$: 종이면에 수직으로 들어가는 방향

$\odot$: 종이면에서 수직으로 나오는 방향

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오.

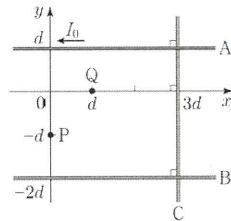
| 보기 |

- ㄱ. $\ominus$ 은 ' $\odot$ '이다.
 ㄴ. 실험 II에서 B에 흐르는 전류의 방향은 시계 방향이다.
 ㄷ. $I_B < I_C$ 이다.

예제 58

■ 2022학년도 대학수학능력시험 물리학 I 18번

그림과 같이 무한히 긴 직선 도선 A, B, C가 xy 평면에 고정되어 있다. A, B, C에는 방향이 일정하고 세기가 각각 I_0 , I_B , $3I_0$ 인 전류가 흐르고 있다. A의 전류의 방향은 $-x$ 방향이다. 표는 점 P, Q에서 A, B, C의 전류에 의한 자기장의 세기를 나타낸 것이다. P에서 A의 전류에 의한 자기장의 세기는 B_0 이다.



위치	A, B, C의 전류에 의한 자기장의 세기
P	B_0
Q	$3B_0$

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오.

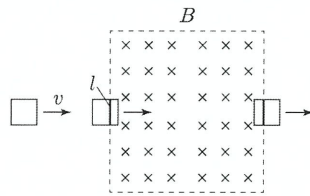
| 보기 |

- ㄱ. $I_B = I_0$ 이다.
- ㄴ. C의 방향은 $-y$ 방향이다.
- ㄷ. Q에서 A, B, C의 전류에 의한 자기장의 방향은 xy 평면에서 수직으로 나오는 방향이다.

[3] 유도 전류

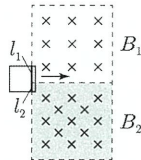
■ 경계선 판단

자기장 영역을 지나는 코일에 흐르는 유도 전류의 세기는 패러데이의 전자기 유도 법칙을 이용하여 계산할 수 있다. 법칙에 따르면 같은 코일에서 유도 전류의 세기 I 는 시간에 따른 자속의 변화율 $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ 에 비례한다. 자속 $\phi = BS$ 이므로 (B 는 자기장, S 는 면적) 코일이 균일한 자기장 영역으로 진입할 때, $\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{B\Delta S}{\Delta t} = \frac{B\Delta(l \times d)}{\Delta t} = Blv$ 이다. (l 은 운동 방향에 수직인 길이, d 는 운동 방향에 나란한 길이) 즉, 자기장의 세기, 경계선의 길이, 속력에 비례한다.



거꾸로 이 상황에서 코일이 균일한 자기장 영역에서 진출할 때에는 자기장의 증감이 반대($0 \rightarrow B \Rightarrow B \rightarrow 0$)가 되므로, 자속의 변화량 $\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -Blv$ 가 된다. 따라서 유도 전류의 세기는 같고, 방향은 반대가 된다.

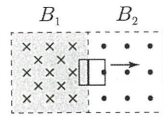
코일이 서로 다른 두 균일한 자기장 영역에 동시에 진입할 때, $\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{B_1\Delta S_1 + B_2\Delta S_2}{\Delta t} = \frac{B_1\Delta(l_1 \times d) + B_2\Delta(l_2 \times d)}{\Delta t} = \left(\frac{l_1}{l_1 + l_2} B_1 + \frac{l_2}{l_1 + l_2} B_2 \right) (l_1 + l_2)v$ 이다. (B_1, B_2 는 자기장, l_1, l_2 는 운동 방향에 수직인 길이, d 는 운동 방향에 나란한 길이) 즉, 유효한 자기장은 길이에 대한 평균이 된다.



주의

유도 전류의 세기는 같은 코일에 대해서만 비교할 수 있다. 서로 다른 코일의 경우 저항값이 다를 수 있기 때문이다.

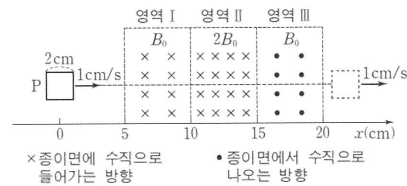
코일이 서로 다른 두 균일한 자기장 영역 사이에서 이동할 때, $\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{B_2\Delta S - B_1\Delta S}{\Delta t} = \frac{B_2\Delta(l \times d) - B_1\Delta(l \times d)}{\Delta t}$
 $= (B_2 - B_1)lv$ 이다. (B_1, B_2 는 자기장, l 은 운동 방향에 수직인 길이, d 는 운동 방향에 나란한 길이) 즉, 유효한 자기장은 자기장의 변화량이 된다.



예제 59

■ 2017학년도 6월 모의평가 물리 I 17번

그림과 같이 정사각형 금속 고리 P가 1cm/s의 속력으로 x 축에 나란하게 등속도 운동하여 자기장 영역 I, II, III을 통과한다. $t=0$ 일 때, P의 중심의 위치는 $x=0$ 이다. I, II, III에서 자기장의 세기는 각각 $B_0, 2B_0, B_0$ 으로 균일하다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오.

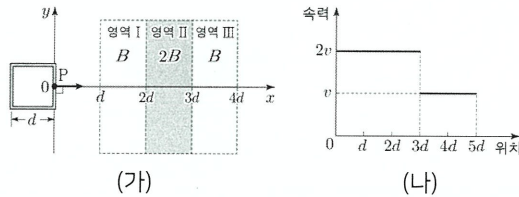
| 보기 |

- ㄱ. $t=5$ 초일 때, P에 흐르는 유도 전류의 방향은 시계 방향이다.
- ㄴ. $t=13$ 초일 때, P에 흐르는 유도 전류는 0이다.
- ㄷ. P에 흐르는 유도 전류의 세기는 $t=10$ 초일 때가 $t=15$ 초일 때보다 작다.

예제 60

■ 2020학년도 9월 모의평가 물리 I 13번

그림 (가)와 같이 한 변의 길이가 d 인 정사각형 금속 고리가 xy 평면에서 $+x$ 방향으로 자기장 영역 I, II, III을 통과한다. I, II, III에서 자기장의 세기는 각각 B , $2B$, B 로 균일하고, 방향은 모두 xy 평면에 수직으로 들어가는 방향이다. P는 금속 고리의 한 점이다. 그림 (나)는 P의 속력을 위치에 따라 나타낸 것이다.

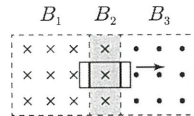


이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오.

| 보기 |

- ㄱ. P가 $x = 1.5d$ 를 지날 때, P에서의 유도 전류의 방향은 $-y$ 방향이다.
- ㄴ. 유도 전류의 세기는 P가 $x = 1.5d$ 를 지날 때가 $x = 4.5d$ 를 지날 때보다 크다.
- ㄷ. 유도 전류의 방향은 P가 $x = 2.5d$ 를 지날 때와 $x = 3.5d$ 를 지날 때가 서로 반대 방향이다.

코일이 서로 다른 세 균일한 자기장 영역 사이에서 이동할 때, $\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{(B_3\Delta S - B_2\Delta S) + (B_2\Delta S - B_1\Delta S)}{\Delta t}$
 $\frac{B_3\Delta(l \times d) - B_1\Delta(l \times d)}{\Delta t} = (B_3 - B_1)lv$ 이다. (B_1, B_2, B_3 은 자기장, l 은 운동 방향에 수직인 길이, d 는 운동 방향에 나란한 길이) 즉,中间的의 자기장은 소거된다.

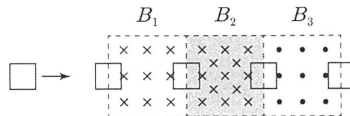


성질

- ① 코일에 흐르는 유도 전류를 계산할 때는 코일과 자기장 영역이 만나는 경계선을 기준으로 판단할 수 있다.
- ② 코일에 흐르는 유도 전류를 계산할 때는 코일 안에서 자기장 영역의 경계선을 기준으로도 판단할 수 있다.

성질 ①과 ②는 동일한 상황을 해석하는 다른 요령이다. ①은 코일에 들어오는 자기장 영역과 나가는 자기장 영역을 각각 고려하여 더해주는 것이고, ②는 대신 내부에서 자기장 영역의 변화를 살펴보는 것이다. 두 관점은 언제든지 교환 가능하다.

코일이 서로 다른 세 균일한 자기장 영역을 차례로 지날 때, 각 경계선을 지나는 순간 자속의 변화율은 각각 B_1lv , $(B_2 - B_1)lv$, $(B_3 - B_2)lv$, $-B_3lv$ 이다. 이를 모두 더하면 $\{B_1 + (B_2 - B_1) + (B_3 - B_2) - B_3\}lv = 0$ 이다.



성질

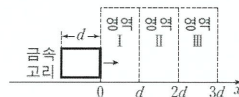
코일이 여러 자기장 영역을 차례로 지날 때, 각 경계선에서 발생하는 유도 전류의 합은 0이다.

이 성질을 이용하면 직접 유도 전류의 세기와 방향을 자속의 변화율로부터 구하지 않아도 된다. 단, 코일이 자기장 영역 바깥에서 들어가기 시작해서 자기장 영역을 나올 때까지 모든 유도 전류를 더해야 하고, 코일 면적의 일부만 자기장 영역에 겹치거나 코일의 속력이 바뀌어서는 안 된다.

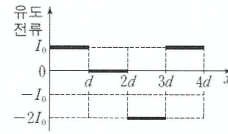
예제 61

■ 2017학년도 대학수학능력시험 물리 I 11번

그림 (가)는 사각형 금속 고리가 균일한 자기장 영역 I, II, III을 향해 $+x$ 방향으로 운동하는 것을 나타낸 것이고, (나)는 고리가 등속도로 I, II, III을 완전히 통과할 때까지 고리에 유도되는 전류를 고리의 위치에 따라 나타낸 것이다. I에서 자기장의 세기는 B 이고, 고리에 시계 방향으로 흐르는 유도 전류를 양(+)으로 표시한다.

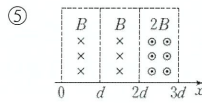
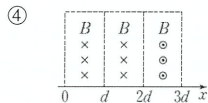
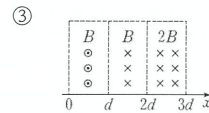
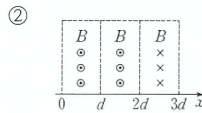
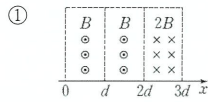


(가)



(나)

영역 I, II, III의 자기장으로 가장 적절한 것은? (단, $\odot$ 는 종이면에서 수직으로 나오는 방향을, $\times$ 는 종이면에 수직으로 들어가는 방향을 의미한다.)



[4] 예제 풀이

예제 45 ㄱ

- ㉔ $F_1 < F_3$ 이므로 대칭성에 의해 전하량의 크기는 B가 A보다 크다.
- ㉔ B가 A보다 전하량이 큰 음(-)전하라고 가정하면, 보강-상쇄에 의해 $x = 2d$ 에서 전기력의 크기(F_4 로 둠)는 $x = 4d$ 에서 F_3 보다 작다. 즉, $F_4 < F_3$ 이다.
- ㉔ 대칭성에 의해 $F_2 < F_4$ 이므로 $F_2 < F_3$ 이어서 조건에 모순이다. 따라서 B는 A보다 전하량이 큰 양(+)전하이다.
- ㄱ. $F_1 < F_3$ 이므로 대칭성에 의해 전하량의 크기는 B가 A보다 크다. (○)
- ㄴ. A와 B의 전하의 종류가 다르고 전하량의 크기는 A가 B보다 작으므로, $x < 0$ 에 평형 위치가 있다. (×)
- ㄷ. $F_1 = 0$ 이 되도록 하는 $Q_A : Q_B = 1 : 16$ 이다. $F_3 < F_2$ 이므로 $\frac{Q_B}{d^2} - \frac{Q_A}{16d^2} < \frac{Q_A}{d^2} + \frac{Q_B}{4d^2}$, $Q_B < \frac{17}{12}Q_A < 16Q_A$ 이다.
- 따라서 평형 위치는 $x = -d$ 보다 왼쪽($-x$ 방향)에 있으므로, X에 작용하는 전기력의 방향은 $+x$ 방향이다. (×)

예제 46 ㄱ, ㄴ, ㄷ

- ㄱ. (가)에서 C는 구간 (A, B)의 바깥($+x$ 방향)에 있고, C에 작용하는 전기력은 0이다. 따라서 A와 B의 전하의 종류는 서로 다르고 전하량의 크기는 A가 B보다 크다. A는 양(+)전하이므로 B는 음(-)전하이다. B는 구간 (A, B)의 사이에 있고, B에 작용하는 전기력의 방향은 $+x$ 방향이다. A(+)가 B(-)에 작용하는 전기력의 방향은 $-x$ 방향인데 합력의 전기력의 방향이 $+x$ 방향이므로, 전하량의 크기는 C가 A보다 크고 C는 양(+)전하이다. 따라서 전하량의 크기는 B가 A보다 크고 C가 A보다 크므로 B는 C보다 작다. (○)
- ㄴ. (가)에서 C에 작용하는 전기력이 0이므로, A와 B에 작용하는 전기력의 방향은 서로 반대이다. 그래야 합력이 0이 된다. 따라서 A에는 $-x$ 방향을 전기력이 작용한다. (나)에서 A는 B와 C로부터 모두 $-x$ 방향을 전기력을 받으므로 합력의 방향은 자연스럽게 $-x$ 방향이다. 따라서 (가)와 (나)에서 모두 $-x$ 방향을 전기력이 작용한다. (○)
- ㄷ. (나)에서 A와 B에 작용하는 전기력의 방향은 각각 $-x$ 방향, $+x$ 방향이다. 이때 C에 작용하는 전기력의 방향은 (전하량이 크고 가까운 A에 의한 전기력이 B에 의한 전기력보다 크므로) $+x$ 방향이다. 합력이 0이어야 하므로, A에 작용하는 전기력($-x$)의 크기가 B에 작용하는 전기력($+x$)의 크기보다 더 크다. (○)

예제 47 $\neg$

- ㄱ. (나)에서 A는 구간 (B, C)의 바깥($-x$ 방향)에 있고, A에 작용하는 전기력은 0이다. 따라서 B와 C의 전하의 종류는 서로 다르고 전하량의 크기는 C가 B보다 크다. B는 양(+)전하이므로 C는 음(-)전하이다. (가)에서 C는 구간 (A, B)의 바깥($+x$ 방향)에 있고, C에 작용하는 전기력의 방향은 $+x$ 방향이다. B(+)가 C(-)에 작용하는 전기력의 방향은 $-x$ 방향인데 합력의 전기력의 방향이 $+x$ 방향이므로, 전하량의 크기는 A가 B보다 크고 A는 음(-)전하이다. (O)
- ㄴ. (나)에서 C에 작용하는 전기력의 방향이 $+x$ 방향에서 $-x$ 방향으로 바뀌었다. 이때 A에 작용하는 전기력이 0이므로, 합력이 0이 되려면 B에 작용하는 전기력의 방향은 $+x$ 방향이여야 한다. A(-)는 B(+)에 $-x$ 방향의 전기력을, C(-)는 $+x$ 방향의 전기력을 작용하므로, 같은 거리 d 만큼 떨어진 동일한 점전하(B)에 작용하는 전기력의 크기는 C가 A보다 크다. 따라서 전하량의 크기는 C가 A보다 크다. (X)
- ㄷ. (나)에서 A에 작용하는 전기력은 0이다. 이제 (나)→(가)로 점전하 배치를 되돌린다고 하자. C가 멀어지므로 C가 A에 작용하는 ($-x$ 방향) 전기력의 크기는 감소한다. 한편, B가 A에 작용하는 ($+x$ 방향) 전기력은 일정하므로, 합력의 변화량의 방향은 $+x$ 방향이다. 따라서 (가)에서 A에 작용하는 전기력의 방향은 $+x$ 방향이다. (가)에서 C에 작용하는 전기력의 방향이 $+x$ 방향이므로, 합력이 0이 되려면 (가)에서 B에 작용하는 전기력의 방향은 $-x$ 방향이다. 한편, (나)에서 B에 작용하는 전기력의 방향은 [ㄴ보기]에서 $+x$ 방향이다. 따라서 (가)에서와 (나)에서가 서로 다르다. (X)

예제 49 $F, +x$ 방향

- ① (가)→(나)에서 $C(x=2d)$ 를 시험 전하로 둔다. A가 $x=0$ 에서 $x=3d$ 로 이동한 상황은, ① $x=0$ 에 있던 A가 사라지고 ② $x=3d$ 에 A가 생기는 상황과 같다. 다시 말해 (가)→(나)에서 C에 작용하는 전기력의 변화량은 ① $x=0$ 에 있던 A가 사라진 것에 의한 전기력의 변화량과 ② $x=3d$ 에 A가 생긴 것에 의한 전기력의 변화량의 합과 같다.
- ② A가 $+x$ 방향으로 거리 d 만큼 떨어져 있는 C에 작용하는 전기력의 크기를 F_{AC} 로 둔다. (가)→(나)에서 ① $x=0$ 에 있던 A가 사라진 것에 의한 전기력의 변화량은 $-\frac{1}{4}F_{AC}$ 이고, ② $x=3d$ 에 A가 생긴 것에 의한 전기력의 변화량은 $-F_{AC}$ 이다.
- ③ $(2F-F) = -\frac{1}{4}F_{AC} - F_{AC}$, $F_{AC} = -\frac{4}{5}F$ 로부터, A와 C는 서로 당기는 방향으로 (거리 d 일 때) 크기가 $\frac{4}{5}F$ 인 전기를 작용한다. 따라서 A는 음(-)전하이다.
- ④ (가)에서 A는 C에 $-\frac{1}{5}F$ 의 전기력을 작용하는데 C에 작용하는 전기력 합력은 F 이므로 B가 C에 $F - \left(-\frac{1}{5}F\right) = +\frac{6}{5}F$ 의 전기력을 작용한다. 따라서 B는 양(+)전하이다.
- ⑤ A는 음(-)전하, B와 C는 양(+)전하이므로 (가)에서 A에 작용하는 (크기가 $2F$ 인) 전기력 방향은 $+x$ 방향이다.
- ⑥ 이제 (가)→(다)에서 A를 시험 전하로 둔다. 잘 살펴보면 C의 위치가 A로부터 $+2d$ 인 위치에서 $-d$ 인 위치로 이동한 것만 따져주면 된다는 것을 알 수 있다. $+2d$ 인 위치에 있던 C가 사라졌으므로 이 변화량은 $-\frac{1}{4} \times \frac{4}{5}F$ 이고, $-d$ 인 위치에 C가 생겨났으므로 이 변화량은 $-\frac{4}{5}F$ 이다. 더해주면 총 변화량은 $-F$ 이다.
- ⑦ 처음 전기력이 $+2F$ 이므로 나중 전기력은 $2F - F = +F$ 이다. 따라서 (다)에서 A에 작용하는 전기력의 크기는 F 이고 방향은 $+x$ 방향이다.

예제 50 ㄱ

- ㄱ. 바깥 구간에 자기장이 0인 경계가 있으므로 B에 흐르는 전류의 방향은 A의 반대 방향인 $-y$ 방향이다. (○)
 ㄴ. 바깥 구간에 자기장이 0인 경계가 있으므로 B에 흐르는 전류의 세기는 A에 흐르는 전류의 세기 I_0 보다 작다. (×)
 ㄷ. 두 점에서 A의 영향력이 더 크므로, 각각 A에 의한 자기장의 방향인 종이면에서 나오는 방향, 종이면으로 들어가는 방향이다. 또는 인접한 구간 $x < -d$ 혹은 $-d < x < 0$ 에 위치하므로 자기장의 방향이 서로 반대이다. (×)

예제 51 ㄱ

- ㄱ. C가 p와 q에 만드는 자기장의 크기는 같고 방향은 각각 xy 평면에서 수직으로 나오는 방향, xy 평면에 수직으로 들어가는 방향이므로, A와 B가 p와 q에 만드는 자기장의 크기는 같고 방향은 각각 xy 평면에 수직으로 들어가는 방향, xy 평면에서 수직으로 나오는 방향이다. 따라서 A와 B 사이에 자기장이 0인 점(선)이 있어야 하므로 A와 B에 흐르는 전류의 방향은 $+y$ 방향으로 같다. (○)
 ㄴ. 대칭성에 의해 A와 B에 흐르는 전류의 세기는 같고, p에서 A에 의한 자기장의 세기는 A와 B에 의한 자기장의 세기보다 크다. p에서 C에 의한 자기장의 세기는 A와 B에 의한 자기장의 세기와 같으므로 A에 의한 자기장의 세기보다 작고, p에서 A와 C로의 거리는 같으므로, 도선에 흐르는 전류의 세기는 A에서가 C에서보다 크다. 따라서 A에 흐르는 전류의 세기는 I 보다 크다. (×)
 ㄷ. r에서 A와 B에 의한 자기장의 방향과 C에 의한 자기장의 방향이 모두 xy 평면에 수직으로 들어가는 방향이므로, A, B, C에 의한 자기장의 방향은 xy 평면에 수직으로 들어가는 방향이다. (×)

예제 52 ㄱ, ㄴ, ㄷ

- ㄱ. $I=0$ 일 때, b에 의한 영향력이 a에 의한 영향력보다 크므로 xy 평면에서 수직으로 나오는 방향이다. (○)
 ㄴ. $B=0$ 일 때, O에서 자기장이 0이려면 c가 O에 만드는 자기장의 방향은 xy 평면에 수직으로 들어가는 방향이어야 한다. 따라서 c에 흐르는 전류 I 의 방향은 $-y$ 방향이다. (○)
 ㄷ. $B=0$ 일 때, O에서 자기장이 0이므로 $\frac{I_0}{2} + \frac{I}{2} = I_0$. $I=I_0$ 이다. (○)

예제 53 ㄱ, ㄷ

- ㄱ. (그래프의 기울기) R에 흐르는 전류의 세기가 $0 < I_R < 1.5I_0$ 일 때 O에서의 자기장의 방향이 xy 평면에서 수직으로 나오는 방향(⊙방향)이므로, R에 흐르는 전류의 세기가 커질 때, O에서의 자기장의 변화량의 방향은 xy 평면에 수직으로 들어가는 방향(×방향)이다. 따라서 R에 흐르는 전류의 방향은 $-y$ 방향이어야 한다. (○)
 ㄴ. (그래프의 I_R 절편) Q에 의한 자기장의 방향은 ⊙방향이고 R에 의한 자기장의 방향은 ×방향인데, 전류에 의한 자기장 세기는 Q에서(I_0, d)가 R에서($1.5I_0, 2d$)의 $\frac{4}{3}$ 배로 더 크다. 따라서 Q와 R에 의한 자기장의 방향은 ⊙방향이 고, P에 의한 자기장의 방향은 ×방향(수직으로 들어가는 방향)이어야 한다. (×)
 ㄷ. (그래프에 주어진 점) (나)에서 점 ($I_R = I_0, B = B_1$)와 점 ($I_R = 1.5I_0, B = 0$)로부터, 거리 $2d$ 에서 전류의 세기의 변화량 크기가 $1.5I_0 - I_0 = 0.5I_0$ 일 때 자기장의 세기의 변화량 크기는 $B_1 - 0 = B_1$ 이다. 따라서 거리 $2d$ 에서 전류의 세기가 $0.5I_0$ 일 때 자기장의 세기는 B_1 이고, 거리 d 에서 전류의 세기가 I_0 일 때 자기장의 세기는 $4B_1$ 임을 알 수 있다. $I_R = I_0$ 일 때 Q와 R에 의한 자기장의 세기는 $3B_1$ 이므로, 이를 상쇄해서 $B = B_1$ 이 되게 하려면 (O에서) P에 의한 자기장의 세기는 $3B_1 - B_1 = 2B_1$ 이어야 한다. (○)

예제 56 ㄱ

- ㄱ. ㉠이 $+y$ 이면 자기장의 세기가 B_0 이어야 하므로 모순이다. 따라서 ㉠은 $-y$ 이다. (○)
 ㄴ. $I_0 \rightarrow B_0$, $-I_0 \rightarrow 0$ 이므로 $-2I_0 \rightarrow -0.5B_0$ 이다. 따라서 ㉡은 ㉠과 반대 방향이다. (×)
 ㄷ. $I_0 \rightarrow B_0$, $-I_0 \rightarrow 0$ 이므로 $-2I_0 \rightarrow -0.5B_0$ 이다. 따라서 ㉢ = $\frac{1}{2}B_0$ 이다. (×)

예제 57 ㄱ, ㄴ, ㄷ

- ㄱ. A에 흐르는 전류의 방향이 시계 반대 방향이므로, I에서 자기장의 방향은 종이면에서 수직으로 나오는 방향이다. (○)
 ㄴ. A에 흐르는 전류의 방향이 시계 반대 방향이므로, II에서 자기장의 방향이 종이면에 수직으로 들어가는 방향이라면 B에 흐르는 전류는 시계 방향이어야 한다. (○)
 ㄷ. I과 II로부터 B에 의한 자기장은 종이면에 수직으로 들어가는 방향으로 $1.5B_0$ 이고, II와 III으로부터 C에 의한 자기장은 종이면에서 수직으로 나오는 방향으로 $1.5B_0$ 이다. 반지름은 C가 B보다 크므로 전류의 세기는 $I_B < I_C$ 이다. (○)

예제 58 ㄷ

- ☞ xy 평면에서 수직으로 나오는 $\odot$ 방향을 양(+)으로 두자. P에서 A의 전류에 의한 자기장은 $+B_0$ 이다. Q에서 A의 전류에 의한 자기장은, 거리가 절반($\overline{AP}=2d$, $\overline{AQ}=d$)이므로 $+2B_0$ 이다. (즉, 전류의 세기가 I_0 이고 거리가 d 일 때 자기장의 세기는 $2B_0$)
 ☞ P와 Q는 B로부터 각각 거리 d , $2d$ 만큼 떨어져 있으므로, B에 의한 자기장의 세기는 각각 $2B$, B 로 둘 수 있다. (즉, 전류의 세기가 I_B 이고 거리가 d 일 때 자기장의 세기는 $2B$) 자기장 방향은 알 수 없다.
 ☞ P와 Q는 C로부터 각각 거리 $3d$, $2d$ 만큼 떨어져 있고, C에 흐르는 전류의 세기($3I_0$)는 A에 흐르는 전류의 세기(I_0)의 3배이다. 따라서 C에 의한 자기장의 세기는 각각 $2B_0$, $3B_0$ 이다. 자기장 방향은 알 수 없다.
 ☞ C에 의한 자기장 방향이 음(-)이라고 가정해보자. P와 Q에서 A와 C에 의한 자기장은 각각 $+B_0 - 2B_0 = -B_0$, $+2B_0 - 3B_0 = -B_0$ 이다. 그러면 B에 의한 자기장을 더하면, $\begin{cases} |2B - B_0| = B_0 \\ |B - B_0| = 3B_0 \end{cases}$ 이어야 한다. 이를 만족시키는 B 는 존재하지 않으므로 모순이다. 따라서 C에 의한 자기장은 각각 $+2B_0$, $+3B_0$ 이다.
 ㄱ. P와 Q에서 A와 C에 의한 자기장은 각각 $+3B_0$, $+5B_0$ 이다. 그러면 $\begin{cases} |2B + 3B_0| = B_0 \\ |B + 5B_0| = 3B_0 \end{cases}$ 이므로 $B = -2B_0$ 이다. 따라서 거리가 d 일 때 자기장의 세기가 $|2 \times (-2B_0)| = 4B_0$ 이므로 전류의 세기 $I_B = 2I_0$ 이다. (×)
 ㄴ. P와 Q에서 C에 의한 자기장 방향이 양(+)이므로 xy 평면에서 수직으로 나오는 방향이다. 따라서 C에 흐르는 전류의 방향은 $+y$ 방향이다. (×)
 ㄷ. Q에서 자기장은 $+3B_0$ 이므로 xy 평면에서 수직으로 나오는 방향이다. (○)

예제 59 L, C

- ㄱ. $t=5$ 초일 때 P는 I (xy 평면에 수직으로 들어가는 방향)에 들어가고 있으므로 유도 전류의 방향은 시계 반대 방향이다. (×)
- ㄴ. $t=13$ 초일 때 P는 II 안에서 운동하고 있으므로 자속의 변화량이 0이고, 유도 전류도 0이다. (○)
- ㄷ. $t=10$ 초일 때 P를 통과하는 자기장 세기의 변화량 크기가 $|2B_0 - B_0| = B_0$ 이고, $t=15$ 초일 때 P를 통과하는 자기장 세기의 변화량 크기가 $B_0 + 2B_0 = 3B_0$ 이므로, 유도 전류의 세기는 $t=10$ 초일 때가 $t=15$ 초일 때보다 작다. (○)

예제 60 L, C

- ㄱ. P가 $x=1.5d$ 를 지날 때, 금속 고리는 I에 진입하는 중이므로 유도 전류는 시계 반대 방향으로 흐른다. 따라서 P에서의 유도 전류의 방향은 $+y$ 방향이다. (×)
- ㄴ. P가 $x=1.5d$ 를 지날 때와 P가 $x=4.5d$ 를 지날 때, 경계에서 자기장 변화량의 크기는 B 로 같고 속력의 비는 $2:1$ 이므로, 유도 전류의 세기는 P가 $x=1.5d$ 를 지날 때가 P가 $x=4.5d$ 를 지날 때보다 크다. (○)
- ㄷ. P가 $x=2.5d$ 를 지날 때와 P가 $x=3.5d$ 를 지날 때, 경계에서 자기장 변화량은 각각 $2B - B (>0)$, $B - 2B (<0)$ 이고 운동 방향은 같으므로 유도 전류의 방향은 서로 반대이다. (○)

예제 61 ②

- ① (나)의 $0 \sim d$ 구간, $d \sim 2d$ 구간, $2d \sim 3d$ 구간에서 유도 전류는 각각 영역 I의 자기장 B , 영역 I $\rightarrow$ II의 자기장 변화량 $B_2 - B$, 영역 II $\rightarrow$ III의 자기장 변화량 $B_3 - B_2$ 에 비례한다.
- ② $d \sim 2d$ 구간에서 유도 전류가 0이므로 $B_2 - B = 0$, $B_2 = B$ 이다.
- ③ $2d \sim 3d$ 구간에서 $B_3 - B_2 = -2 \times B$, $B_3 = -B$ 이다.
- ④ 고리에 시계 방향으로 흐르는 유도 전류가 양(+)이므로 자기장 영역의 자기장 방향은 종이면에서 수직으로 나오는 방향($\odot$)이 양(+)이다. 따라서 영역 I, II, III의 자기장으로 가장 적절한 것은 $[\odot B, \odot B, \times B]$ 이다.

