

CHAPTER

08 전기력

최근 들어 평가원 물리학 I 4페이지 19번에 등장하고 높은 오답률을 기록하는 등 갑작스럽게 난이도가 높아진 단원이다. 평가원 물리학 I 시험지를 보면, 이 단원에서 개념을 묻는 문제 여러 개와 직접 계산을 해야 하는 킬러 문제 하나가 출제된다. 제대로 공부하지 않고 문제를 풀게 되면 실수하기 쉽고, 고난도 문제는 접근을 잘못하면 하루 종일 계산만 하다가 끝날 수 있으니 주의해야 한다.

4페이지에 나오는 킬러 문항의 경우, 물론 단순 계산으로도 풀 수는 있겠지만 이 책에서 설명해줄 대칭성과 작용/반작용의 법칙을 이용하면 실수 없이 훨씬 수월하게 풀 수 있다.

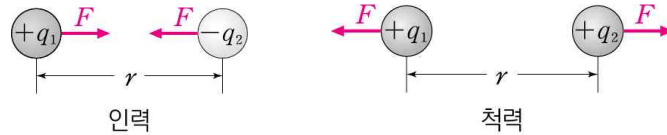
22학년도 수능에서 점전하 5개가 나오는 등 난이도가 급상승했기 때문에, 더욱 열심히 대비할 필요가 있다.

비역학 킬러 문항을 빠르고 정확하게 풀어내는 것이 역학 킬러 문항을 풀어내기 위한 첫 번째 발걸음을 잊지 말자.

☒ 전기력

◆ 1. 전기력의 정의

전기력은 전하 사이에 작용하는 힘으로, 인력과 척력 두 종류가 있다. 다른 종류를 띤 전하들 사이에는 인력이, 같은 종류를 띤 전하들 사이에는 척력이 작용한다.



전기력 : 전하 사이에 작용하는 힘

전하량이 각각 q_1 , q_2 인 두 점전하 사이의 거리가 r 일 때 두 점전하 사이에 작용하는 전기력의 크기 F 는 쿨롱 법칙에 의해 다음과 같다.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (\text{진공 중에서 쿨롱 상수 } k = 8.99 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)$$

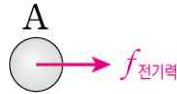
☞ 전기력 chapter에서 학생들이 착각하기 쉬운 대표적인 요소들을 미리 점검하고 넘어가자.

1. 많은 학생들이 전기력을 “전기”로만 이해하는 경향이 있다. 그런데 이렇게 되면 뒤에서 나올 작용 반작용의 법칙과, 계 내부에서의 상호작용은 무시해도 된다는 성질을 전기력 chapter에 적용하는 걸 어색하게 느끼기 쉽다. 이 책을 읽는 학생들은 잠시 멈춰서 한 번만 생각하고 넘어가자.
전기력도 힘이다.
2. 그렇지만 위 식에서도 보이듯이, 전기력과 전하량은 절대 동떨어진 개념이 아니다. 문제를 풀다 전기력과 관련된 조건이 나오면 이를 전하량에, 전하량과 관련된 조건이 나오면 이를 전기력에 각각 대응할 수 있어야 한다.
문제를 풀 때, 풀이에서 **전기력과 전하량을 자유롭게 넘나들 수 있어야 한다**는 말이다.
3. 전기력 공식을 뒤에서 볼 자기력 공식과 헷갈려 분모에 r 을 넣고서 당황하는 학생들이 종종 있다. 시험장에서 이런 실수를 하게 되면 멘탈에 지장이 생기기 쉽다. **전기력 공식은 r^2 이다.** 주의하자.

◆ 2. 전기력 표시하기

본격적으로 시작하기에 앞서, 전기력을 표시하는 방법을 정리하고 넘어가자.

(1) 전기력의 방향은 화살표로 표시한다.



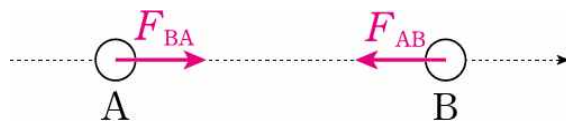
역학 단원의 속도/가속도와 달리 방향을 부호로 취급하지 않는 것이 좋다. 쉽게 말해 +방향, -방향의 구별이 위험하다는 말이다. 이 단원에서는 전하의 부호가 +, -로 사용되기 때문에, 애초부터 헷갈리지 않게 방향 구별을 화살표로 하자.

(2) 전기력의 크기를 다룰 때는 상댓값을 이용한다.

전기력 F 를 계산한 결과에서 분자의 k , Q^2 과 분모의 d^2 은 결국 상수인 셈이니 임의의 기호로 대체할 수 있다.

예를 들어 “거리 d 만큼 떨어진 전하량 크기의 곱이 $1Q^2$ 인 두 전하가 서로에게 작용하는 전기력의 크기”를 f 라 하면, 거리 $2d$ 만큼 떨어진 전하량 크기의 곱이 $2Q^2$ 인 두 전하가 서로에게 작용하는 전기력의 크기는 상댓값을 통해 $\frac{1}{2}f$ 라 표현할 수 있다.

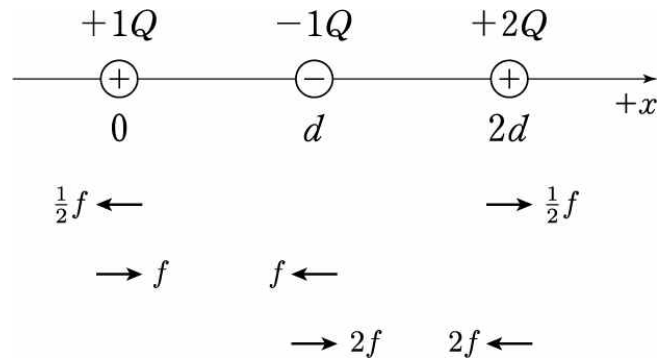
(3) 아래첨자를 이용하여 전기력을 표시할 수 있다.



F_{AB} 혹은 f_1 , f_2 처럼 아래첨자를 이용하여 전기력을 표시하는 방법도 있다. 일반적으로 A가 B에게 가하는 힘을 F_{AB} 와 같이 표시하는데, 이는 세 개 이상의 전하 사이의 힘들 중에서 각각 누가 누구에게 작용하는 힘인지 구별하는 데 도움이 된다.

(4) 줄을 맞춰서 전기력을 직관적으로 표시할 수 있다.

3번이 싫은 학생들에게 아래 그림처럼 줄을 맞춰서 표시하는 방법을 추천한다.



예를 들어 $+1Q$, $-1Q$, $+2Q$ 의 세 전하가 일직선상에 차례로 d 의 거리를 두고 있는 경우를 생각해보자. $+1Q$ 와 $+2Q$ 의 상호 작용에 의한 작용 반작용의 두 힘을 각 전하 밑에 표시하고, $+1Q$ 와 $-1Q$ 사이의 상호작용은 조금 내려서 표시, $-1Q$ 와 $+2Q$ 사이의 상호작용은 조금 더 내려서 표시하는 식이다. 이후 각각의 전하에 대해 세로로 적힌 힘들을 합하면 알짜힘을 구할 수 있다.

☞ 전기력 표시 방법 정리!

1. 전기력의 방향은 화살표로 표시한다.
2. 전기력의 크기를 다룰 때는 상댓값을 이용한다.
3. 아래첨자를 이용하여 전기력을 표시할 수 있다.
4. 줄을 맞춰서 전기력을 직관적으로 표시할 수 있다.

전기력 chapter의 핵심은 크게 세 가지로 볼 수 있다.

1. 임의의 전하가 받는 총 전기력이 합이 0인 지점 찾기
2. 작용-반작용의 법칙 적용하기
3. 변화량 풀이 이해하기

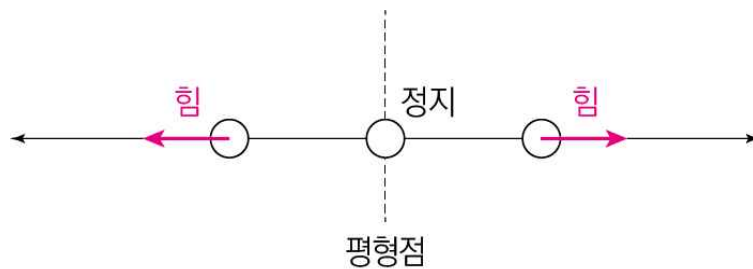
이제 이 세 가지 핵심 지점들이 정확히 어떤 의미인지 알아보도록 하자.

◇ 3. 평형점 찾기

전기력 문제의 풀이는 각각 전하의 부호를 찾는 것에서 시작된다. 전하들 각각의 부호를 찾는다는 것은 결국 누가 누구를 당기고 미는지를 알아내는 것과 같은데, 세 개 이상의 전하가 나올 때 전하들의 부호를 알아보기 위해 아래 설명할 과정 없이 접근했다간 헛갈리기 쉽다. 각각의 전하들의 부호를 모를 때, 가장 쉽게 접근할 수 있는 방법이 바로 전하를 두 개씩 쳐다보면서 **평형점을 찾는 것이다**.

평형점을 찾는 건 생각보다 간단하다. 두 전하의 부호가 같다면 그 둘 사이에, 반대라면 둘의 연장선상에 평형점이 생기기 때문이다. 그러나 정확한 위치까지는 알 수 없기에 계산을 통해 정확한 위치를 확정해 줄 필요가 있을 때도 있다.

정확한 위치를 확정할 때는 전하량이 +1C인 임의의 점전하 한 개¹²⁾를 내부 또는 외부에 두고 전기력 공식을 두 번 계산해 주면 된다.



12) 평형점은 임의의 전하가 받는 전기력의 합이 항상 0이 되는 지점이므로, 꼭 전하량의 크기가 +1C일 필요는 없다. 다만 계산의 편의를 위해 본 책에서는 +1C로 두는 것이다.

(1) 평형점을 찾으면 알 수 있는 특징들

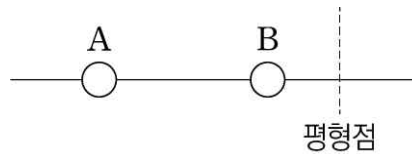
평형점을 찾으면 알 수 있는 특징들이 있다.

먼저, 평형점을 경계로 더 큰 영향력을 행사하는 전하가 역전된다. 말이 좀 어려울 수 있는데, 예를 들어 고정된 두 전하 A, B가 있는데 움직이는 전하 C를 동일 직선상에 놓았다 하자. 이때 C가 A, B가 만드는 평형점을 지나가면, 그 지점을 경계로 C가 받는 전기력의 방향이 변한다. 즉, C가 받는 전기력의 방향에 더 강한 영향력을 행사하는 전하가 바뀐 것이다.

다음으로, 평형점의 위치로부터 멀리 떨어진 점전하의 전하량의 크기가 나머지 하나보다 크다. 이걸 예시를 통해 이해해보자.

〈예시 1 : 평형점이 외부에 있을 때〉

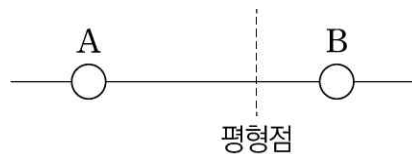
그림과 같이 고정된 두 점전하 A, B가 있을 때 B의 오른쪽에 평형점이 있다고 생각하자.



거리가 가까워질수록 작용하는 전기력의 세기가 세지는데, 평형점으로부터 A가 B보다 멀리 떨어져 있음에도 둘이 작용하는 전기력의 세기가 같으므로 A의 전하량의 크기가 더 큰 것을 알 수 있다.

〈예시 2 : 평형점이 내부에 있을 때〉

그림과 같이 고정된 두 점전하 A, B 내부의 평형점이 B에 더 가까이 있다고 생각하자.



마찬가지로 거리 that 가까워질수록 작용하는 전기력의 세기가 세지는데, 평형점으로부터 A가 B보다 멀리 떨어져 있음에도 둘이 작용하는 전기력의 세기가 같으므로 A의 전하량의 크기가 더 큰 것을 알 수 있다.

실수 주의!

실전에서 문제를 빠르게 풀다 보면 무의식적으로 머릿속에 “가까워질수록 세기가 세진다”만 남아, “가깝다 = 크다”로 문제를 풀어버릴 수 있다. 위 예시들 상황으로 생각하면 평형점이 B랑 가까우므로 B의 전하량의 크기가 A보다 크다고 풀고 넘어간다는 말이다. 이걸 진짜 조심해야 한다. 진짜.

(2) 평형점 주변에 고정되지 않은 전하를 가만히 두었을 때

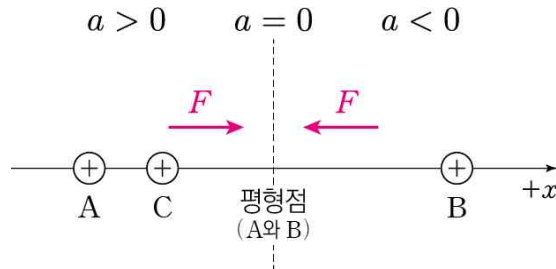
평형점 주변에 고정되지 않은 전하를 가만히 두면, 그 전하는 평형점을 향해 움직이지만 평형점을 통과하고 지나가지, 평형점에서 정지하지는 않는다.

평형점에선 전기력에 의한 알짜힘이 0기 때문에 가속도가 0인데, 이를 자칫 잘못 생각하면 오개념이 생길 수 있다. 문제를 풀다 발문에 “점전하들 사이에 입자를 두었더니 서서히 움직여서 정지했다.”라는 표현을 보고 그 입자가 정지한 위치를 평형점으로 착각하는 경우가 그러하다.

역학 단원을 잘 생각해보면 $+x$ 방향으로 이동하는 물체의 알짜힘의 방향이 $+x$ 에서 $-x$ 로 변했다고 물체가 멈추지 않는다. 속력의 크기가 점점 증가하다 점점 감소할 뿐이고, 물체가 실제로 정지하는 지점은 알짜힘이 아니라 속도가 0인 지점이다.

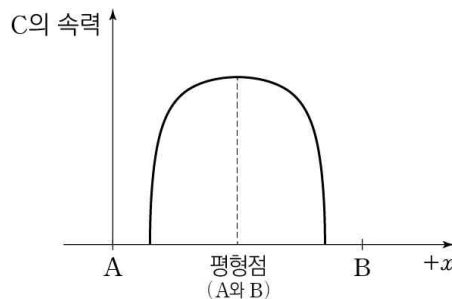
전기력 단원도 마찬가지인데, 예시를 통해 이해해보자.

그림과 같이 고정된 양(+) A , B 가 만드는 평형점 왼쪽에 고정되지 않은 양(+) C 를 두었다.



C 는 평형점 왼쪽에선 $+x$ 방향으로 전기력을 받고, 이때 평형점에 도달하기 전까지는 가속도 $a > 0$ 이기 때문에 속력이 점점 증가한다. 이후 평형점에서 C 의 속력은 최대가 되고, 속력이 점점 감소하여 평형점에서 $+x$ 방향으로 더 운동한 뒤 정지한다.

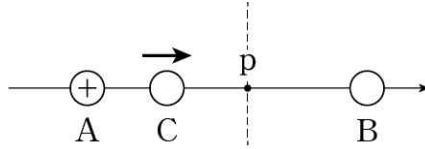
위치에 따른 C 의 속력을 대강 표현하면 다음과 같다.



이건 팁인데, 앞서 봤듯이 어떤 입자가 움직이다 멈추면 평형점은 입자의 정지 지점을 기준으로 정지하기 직전 방향의 반대 방향에 있다. 위의 경우에는 C 가 오른쪽으로 운동하다 멈췄으니 평형점은 정지 지점의 왼쪽에 있음을 알 수 있다.

연습 문항 1

그림과 같이 점전하 A, B가 각각 고정되어 있다. A는 양(+)전하이다. A, B사이에 임의의 입자 C를 놓았더니, B 방향으로 서서히 움직여 C가 받는 전기력의 합이 0이 되는 지점인 p를 지났다.

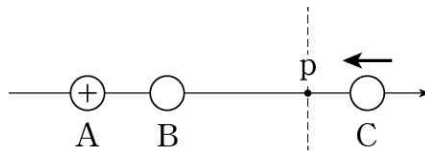


1-1. B, C 각각의 부호를 구하시오.

1-2. C의 알짜힘의 방향에 더 많은 영향을 미치는 전하는 p를 기점으로 어떻게 바뀌는지 쓰시오.

연습 문항 2

그림과 같이 점전하 A, B가 각각 고정되어 있다. A는 양(+)전하이다. A, B 바깥에 임의의 입자 C를 놓았더니, B 방향으로 서서히 움직여 C가 받는 전기력의 합이 0이 되는 지점인 p를 지났다.



2-1. B, C 각각의 부호를 구하시오.

2-2. C의 알짜힘의 방향에 더 많은 영향을 미치는 전하는 p를 기점으로 어떻게 바뀌는지 쓰시오.



1-1) 둘 다 양(+)전하이다.

A와 B 사이에 C가 받는 전기력의 합이 0인 지점 p가 있으므로, A와 B의 부호는 같다. 따라서 B는 양(+)전하이다. 그리고 지점 p를 기준으로 C가 받는 전기력의 방향이 바뀌는데, 왼쪽에선 A가 C의 방향에 B보다 더 많은 영향을 미친다. 그런데 C는 A로부터 멀어지고 있으므로 C도 A와 부호가 같다. 따라서 C도 양(+)전하이다.

1-2) C가 p의 왼쪽에 있을 때는 A가 C가 받는 전기력의 방향을 결정하고, 오른쪽에 있을 때는 B가 결정한다.

(※ 변의 : 이 연습 문항에선 C가 전기력의 합이 0이 되는 지점 p를 지난다고 설명했지만, 다른 문제에서는 “C는 p에서 가속도가 0이다”, “p를 지나면서 C의 가속도 방향이 바뀐다” 등으로 바꿔 표현해줄 수도 있다.)

2-1) 둘 다 음(-)전하이다.

A와 B 바깥에 C가 받는 전기력이 0인 지점 p가 있으므로, A와 B의 부호는 반대이다. 따라서 B는 음(-)전하이다. 여기서 한 가지 조건을 더 확인할 수 있는데, 만약 B의 전하량의 크기가 A보다 크다면 C가 받는 전기력의 합이 0이 될 수가 없으므로¹³⁾ A의 전하량의 크기가 B보다 크다는 것도 알 수 있다.

지점 p를 기준으로 C가 받는 전기력의 방향이 바뀌는데, B에 한없이 가까운 지점에 C를 놓게 되면 C가 받는 전기력의 방향은 B가 결정하게 되므로, C가 p의 오른쪽에서 왼쪽으로 가면서 C가 받는 전기력의 방향을 결정하는 점전하는 A에서 B로 변한다.

따라서 p의 오른쪽에서 C는 A 방향으로 이동하고 있으므로 둘의 부호는 반대이고, C는 음(-)전하이다.

2-2) C가 p의 오른쪽에 있을 때는 C가 받는 전기력의 방향을 A가 결정하고, 왼쪽에 있을 때는 B가 결정한다.

13) 만약 B의 전하량의 크기가 A보다 크다면, 쿨롱 법칙에 따라 전기력은 거리 제곱에 반비례하고 전하량의 곱에 비례하므로 C로부터의 거리가 A보다 더 작은 B가 C에 가하는 힘이 항상 더 크게 된다. 따라서 C가 받는 전기력의 합은 0이 될 수 없다.

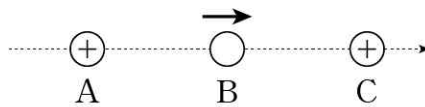
(3) 작용-반작용의 법칙

전기력은 전하 사이에 작용하는 “힘”이다. 따라서 당연히 힘을 주고받는 전하들 사이에 작용-반작용의 법칙이 성립한다. 여기서 조금만 더 생각해 보면, 문제에서 주어진 전하들 전체를 하나의 계로 잡았을 때, 전하들끼리 작용하는 힘과 그 반작용은 계 내부에서의 상호작용이므로 상쇄됨을 알 수 있다. 이를 이용하면 문제에서 주어진 상황에 따라 각 전하들이 받는 전기력의 방향도 유추할 수 있다.

간단한 연습 문항을 풀면서 이해해보자.

연습 문항

그림은 고정된 두 점전하 A, C 사이에 점전하 B를 가만히 놓았더니, B가 움직이기 시작하는 모습을 나타낸 것이다. B를 가만히 놓는 순간, B가 받는 전기력의 방향은 오른쪽이고 A가 받는 전기력의 크기는 0이다.



1. C가 받는 전기력의 방향을 결정하시오.
2. B의 부호를 결정하시오.
3. B, C의 전하량의 크기를 비교하시오.
4. B가 받는 전기력의 크기와 C가 받는 전기력의 크기를 비교하시오.
5. A, C사이 평형점은 현재 B로부터 어느 쪽에 위치하는지 그림에 표시하시오.



1. A, B, C 전체를 하나의 계로 볼 때 외부력이 없으므로 합력은 0이다. 따라서 A가 받는 전기력의 크기가 0인 것을 생각하면 C가 받는 전기력의 방향은 자연스럽게 왼쪽이 된다.

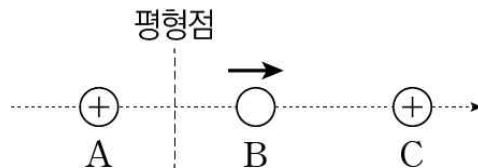
그리고 앞에서 공부했던 걸 적용해보자.

2. A와 C는 부호가 같으므로 서로 미는 방향으로 전기력이 작용한다. 그런데 C가 A를 왼쪽으로 밀고 있음에도 A가 받는 전기력의 크기가 0이라는 건 B가 A를 오른쪽으로 당기고 있기 때문이고, 따라서 B는 음(-)전하이다.

3. C가 B보다 A로부터 더 멀리 떨어져 있음에도 A에 작용하는 힘의 세기가 B와 같다. 따라서 전하량의 크기는 C가 B보다 크다. 쉽게 설명하면 평형점으로부터 거리는 C가 B보다 멀기 때문에 C의 전하량의 크기가 B보다 크다는 것이다.

4. B에 작용하는 알짜힘과 C에 작용하는 알짜힘이 서로 상쇄되어 전체 계의 합력이 0이 된다. 따라서 B에 작용하는 전기력과 C에 작용하는 전기력의 크기는 같다.

5. A와 C는 부호가 같기 때문에, 둘 사이에 평형점이 무조건 존재한다. 그런데 현재 B는 A, C 모두와 부호가 다름에도 C 방향으로 움직이고 있다. 이는 B의 전기력의 방향이 C의 영향을 받는 것으로 해석할 수 있고, 따라서 A와 C가 만드는 평형점은 현재 B보다 왼쪽에 위치한다.



Tip! 두 점전하의 크기를 비교하기 어려울 때

문제를 풀다 보면, “전하량의 크기는 A가 B보다 작다.”와 같은 선지가 많이 등장한다.

보통 이런 경우의 풀이는

- ① A가 C보다 전하량이 크고, C가 B보다 전하량이 큰 상황 (간접 비교)
- ② 곧바로 A가 B보다 전하량이 크다는 게 보이는 상황 (직접 비교)

이렇게 둘로 나눌 수 있는데, 힌트를 잘 숨겨두면 풀이가 잘 안 보일 때가 있다.

이렇게 두 점전하의 부호를 비교하는 상황에서, 만약 비교가 잘 되지 않는다면 **나머지 점전하 하나가 받는 전기력의 방향과 세기를 살펴보아야 한다.**

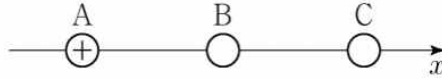
예를 들어, 앞서 살펴본 연습 문항에서 3번을 보면 B와 C의 전하량 크기를 비교하고 있다. 이런 경우에 나머지 A가 받는 전기력을 보면 0이므로, B와 C가 만드는 평형점에 A가 위치하기 때문에 B와 C의 전하량 크기를 비교할 수 있다.

물론 나머지 점전하 하나가 평형점에 위치하지 않을 때도 있다.

그러한 경우에도, 그 나머지 전하가 받는 전기력의 방향과 세기를 살펴보면 실마리가 분명 잡힐 것이다.

예제(1) 21학년도 6월 평가원 19번

그림과 같이 x 축상에 점전하 A, B, C가 같은 거리만큼 떨어져 고정되어 있다. 양(+)전하 A에 작용하는 전기력은 0이고, B에 작용하는 전기력의 방향은 $-x$ 방향이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

<보 기>

- ㄱ. B는 음(-)전하이다.
- ㄴ. 전하량의 크기는 C가 A보다 크다.
- ㄷ. C에 작용하는 전기력의 방향은 $-x$ 방향이다.



0. 평형점 찾고 성질 적용하기

B와 C에 의해 생긴 평형점에 양(+)전하 A가 존재하는 상황이다. 따라서 B와 C 외부에 평형점이 있다는 뜻이므로, B와 C의 전하의 부호가 다를 수 있다.

1. 계 내부에서의 상호작용은 상쇄됨을 이용하기

B에 작용하는 전기력의 방향이 $-x$ 방향이라 했는데, 전체를 하나의 계로 보았을 때 내부력의 합은 0이 되어야 하므로 C에 작용하는 전기력의 방향은 $+x$ 방향이다. (ㄷ 틀림)

2. 가정해서 모순 찾기

만약 B와 C의 부호가 각각 +, -라면 B와 C에 작용하는 전기력의 방향이 각각 $+x$ 방향, $-x$ 방향이 되어 모순이 발생한다. 따라서 B는 음(-)전하, C는 양(+)전하이다. (ㄱ 맞음)

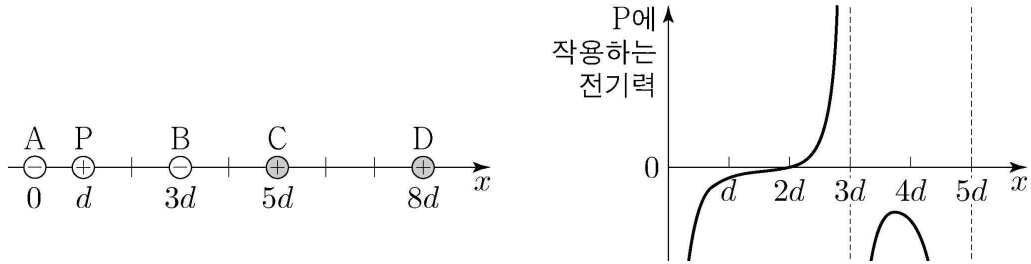
ㄴ 선지에서 A와 C의 전하량 크기를 비교하고 있으니, 나머지 점전하 B가 받는 전기력을 확인하자.

B는 A와 C로부터 같은 거리만큼 떨어져 있는데 전기력을 $-x$ 방향으로 받고 있다. 즉, A가 B를 당기는 힘이 C가 B를 당기는 힘보다 강하다. 따라서 A의 전하량의 크기가 C보다 크다. (ㄴ 틀림)

정답 : ㄱ

예제(3) 22학년도 수능 19번

그림 (가)와 같이 x 축상에 점전하 A ~ D를 고정하고 양(+전하)인 점전하 P를 옮기며 고정한다. A, B는 전하량이 같은 음(-)전하이므로 C, D는 전하량이 같은 양(+전하)이다. 그림 (나)는 P의 위치 x 가 $0 < x < 5d$ 인 구간에서 P에 작용하는 전기력을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

<보 기>

- ㄱ. $x = d$ 에서 P에 작용하는 전기력의 방향은 $-x$ 방향이다.
- ㄴ. 전하량의 크기는 A가 C보다 크다.
- ㄷ. $5d < x < 6d$ 인 구간에 P에 작용하는 전기력이 0이 되는 위치가 있다.



0. 문제 상황 파악하기

최초로 점전하 5개를 다루는 상황이 등장했는데, 이렇게 굉장히 생소한 상황이 등장하면 우리는 특이한 것들을 찾아내야 한다.

제일 먼저 힘의 평형을 이루는 지점을 주목할 수 있다. 특이하기 때문이다.

그리고 문제 상황에서 특이한 게 또 하나 있는데, 바로 대칭성이다. $x = 4d$ 에 대해 점전하 A, B와 C, D는 대칭을 이룬다. (하지만 현장에서 대칭성을 바로 발견하기는 매우 어려우므로, 우리는 대칭성을 발견하지 못한 상황과 발견한 상황 둘 다의 관점에서 문제를 풀어보도록 하자.)

1. 그래프의 부호를 전기력 방향에 대응하기

양(+)전하 P를 $x = 0$ 의 오른쪽에 엄청 가까이 두자. 그러면 A의 영향력이 압도적으로 커지므로, P에 작용하는 전기력은 $-x$ 방향일 것이다. 그래프에서 $x = 0$ 의 오른쪽에 엄청 가까운 지점을 보면 P에 작용하는 전기력의 부호가 음(-)이다.

따라서 그래프의 값이 음(-)일 때 P는 $-x$ 방향으로, 그래프의 값이 양(+)일 때 P는 $+x$ 방향으로 전기력을 받는다. 그러면 $x = d$ 에서 P에 작용하는 전기력의 방향은 $-x$ 방향이다. (ㄱ 맞음)

2. 힘의 평형 지점 이용하기

힘의 평형을 이용하기 위해 A와 B가 $1d$ 떨어져 P를 당기는 힘을 f , C와 D가 $1d$ 떨어져 P를 미는 힘을 F 라 하자. 이제 $x = 2d$ 에서 P에 작용하는 전기력이 0인 상황을 $\frac{3}{4}f = \star F$ 로 표현할 수 있다. (단, 떨어진 거리를 감안해서 \star 은 $\frac{3}{4}$ 보다 훨씬 작은 수이다.)

\star 이 $\frac{3}{4}$ 보다 훨씬 작은 수인데 $\frac{3}{4}f = \star F$ 이기 위해서는 $f < F$ 이어야만 하므로, A와 B의 전하량이 C와 D보다 작음을 알 수 있다. (ㄴ 틀림)

$x = 6d$ 에서 P는 C와 D로부터 $+x$ 방향 전기력 $\frac{3}{4}F$ 를, A와 B로부터 $-x$ 방향 전기력 $\star f$ 를 받으므로, $x = 6d$ 에서 P에 작용하는 전기력의 방향이 $+x$ 방향임을 알 수 있다.

$x = 5d$ 에 가까워질수록 C가 P를 $+x$ 방향으로 미는 전기력은 세지므로, P는 $5d < x < 6d$ 에서 언제나¹⁴⁾ $+x$ 방향으로 힘을 받는다. (ㄷ 틀림)

정답 : ㄱ

14) C와 D는 $x = 6.5d$ 에 대해 대칭이므로, $x = 6.5d$ 에서 C와 D에 의해 P가 받는 전기력은 0이다. 따라서 이 지점에서 P는 확실히 A와 B에 의해 $-x$ 방향으로 전기력을 받을 것이다. 이후 P를 오른쪽으로 더 보내면 $-x$ 방향의 전기력이 더 강해질 것이므로, 이때는 전기력의 방향이 변하지 않는다. 따라서 P가 받는 전기력의 방향은 $5d < x < 6d$ 에서 $+x$ 방향, $6.5d < x < 8d$ 에서 $-x$ 방향이고 $6d < x < 6.5d$ 에서 한 번 변한다.

추가 공부) 대칭성을 활용해 L 해결하기

문제를 잘 들여다보면 $x = 4d$ 에 대해 점전하 A, B와 C, D는 대칭을 이루는 것을 발견할 수 있다. 만약 대칭성을 찾았다면, 대칭의 기준이 되는 $x = 4d$ 주위를 그래프에서 유심히 살펴볼 수 있겠다.

$x = 4d$ 에서 P가 $-x$ 방향으로 이동할 때, P가 받는 전기력의 세기는 점점 약해지다가 세진다. 즉 $-x$ 방향으로 이동할 때는 P가 받는 전기력이 최소인 지점이 생기는 것이다. 그러나 P가 $x = 4d$ 에서 $+x$ 방향으로 이동하면 P가 받는 전기력의 세기는 곧바로 세지고, 최소인 지점은 생기지 않는다.

이를 통해 $x = 4d$ 기준으로 $-x$ 방향에 위치한 점전하 A, B가 $+x$ 방향에 위치한 C, D에 비해 전하량의 크기가 작다는 것을 알 수 있다. (L 틀림)

이 문제에서는 대칭성보다 수식을 활용하는 게 더 쉬워 보일 수 있지만, 이 문제에서 대칭성이 등장했기 때문에 앞으로는 얼마든지 다른 어려운 상황에 대칭성이 핵심으로 적용될 여지가 있다.

따라서 우리는 앞으로 낯선 전기력 상황이 등장했을 때, 특이한 상황을 찾게 되면 **힘의 평형만이 아니라 대칭성도 꼭 생각해봐야 한다.**

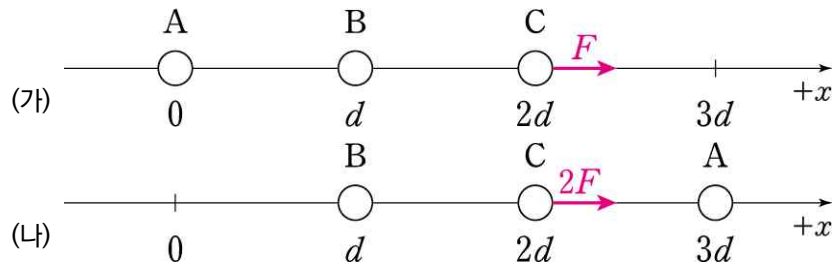
쉽게 말해 한 번 나왔으니 얼마든지 다시 어렵게 응용될 수 있다는 것이다. 꼭 대칭성을 기억하자!!

(4) 변화량 풀이

앞서 본 경우에는 방향과 크기의 대/소 비교만을 다뤘지만, 정확한 값을 구하는 문제도 나올 수 있다. 이 경우엔 전기력 공식을 하나하나 넣어도 정답은 물론 나오겠지만 굉장히 비효율적이므로, 작용-반작용의 법칙과 변화량 풀이를 이용해서 문제를 풀어주면 되겠다.

문제를 풀다보면 고정된 전하의 위치를 출제자가 직접 옮기는 문제를 종종 만나게 된다. 만약 시험 도중에 그런 문제를 만났는데 공식에 숫자를 넣고 계산을 시작하면, 주구장창 계산만 하다가 시험이 끝나버릴지도 모른다. 이를 예방하기 위해 우리는 변화량 풀이를 배울 것이다. 이 풀이의 요지는 **변하지 않는 값을 굳이 계산하지 않는 것**, 그리고 전하의 위치가 옮겨질 때는 **원래 위치의 전하가 사라지고 새로운 위치에서 생겨난 것**으로 이해하는 것이다.

전하가 사라지고 생겨났다는 말이 잘 와닿지 않는다면 다음 예시를 살펴 보자.



A가 0에서 $3d$ 로 이동해서 C가 받는 전기력의 세기가 F 에서 $2F$ 로 강해졌다. 이런 상황에서 숫자를 대입하며 끼워 맞추거나 어찌할 줄 모르기 쉬운데, 우리는 이럴 때 침착하게 “변한 것만 쳐다보니 A가 0에서 사라지고 $3d$ 에서 생겼다”라고 이해하자. A와 C가 d 만큼 떨어져 있을 때 작용하는 전기력의 크기를 f_0 라 하면 우선 방향은 모르더라도 C의 왼쪽에서 $\frac{f_0}{4}$ 가 사라지고 오른쪽에서 f_0 가 생긴 것을 알 수 있다.

그러면 A가 C에 가하는 힘이 $\frac{5f_0}{4}$ 만큼 변해¹⁵⁾ 결국 오른쪽으로 F 가 추가된 것으로 이해할 수 있고,

$f_0 = \frac{4}{5}F$ 임을 알 수 있다. 그리고 A와 C는 서로 당기고 있으므로 둘의 부호가 반대라는 것도 유추할 수 있다.

☞ 변화량 풀이의 핵심

1. 변하지 않는 값은 문제에서 필요로 하기 전까지 계산하지 않는다.
2. 전하가 옮겨지면 원래 위치에서 사라지고 새로운 위치에서 생겨난 것으로 이해한다.

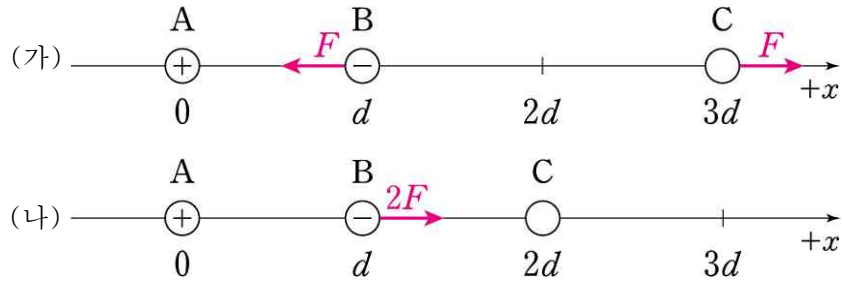
15) 쉽게 생각하면 $-(-\frac{f_0}{4}) + f_0$ 로 볼 수 있다.

우리가 푸는 물리학1 전기력 문제에선 전하 두 개를 한 번에 옮기는 경우가 거의 없다. 한 번에 전하 하나씩 옮기는 것인데, 다시 말하면 나머지 전하들의 위치는 변하지 않는 것이다. 따라서 굳이 문제에서 필요로 하지 않는, 위치가 변하지 않은 전하들까지 고려해가며 문제를 풀 이유가 없다.

연습 문항을 풀면서 이해해보자.

연습 문항

그림 (가), (나)는 점전하 A, B, C가 x 축 상에 고정되어 있는 두 가지 상황을 나타낸 것이다. A는 양(+)
전하, B는 음(-)전하이다. (가)에서는 C에 $+x$ 방향으로 크기가 F 인 전기력이, B에 $-x$ 방향으로 크기가 F 인 전기력이 작용한다. (나)에서는 B에 $+x$ 방향으로 크기가 $2F$ 인 전기력이 작용한다.



1. C의 전하의 부호를 구하고 A, B, C의 전하량의 크기를 비교하시오.
2. (가)에서 각각의 전하에 작용하는 힘을 모두 표시하시오.

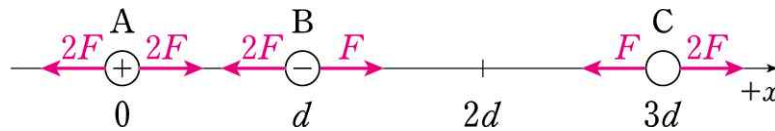


먼저 (가)를 보면 B의 왼쪽에 B와 C 둘의 평형점이 존재하며 거기에 A가 위치한 상황이다. 따라서 B와 C의 부호는 반대이고, 전하량의 크기는 C가 더 크다. 즉 C는 양(+)전하이므로, 전하량의 크기는 $C > B$ 이다.

B를 기준으로 (가)와 (나)는 C의 위치만 변했으므로 B가 받는 전기력의 크기 변화량은 온전히 C의 책임이다. B와 C가 d 만큼 떨어져 있을 때 서로 작용하는 전기력의 크기를 f_0 라 하면 (가)에서 (나)로 변할 때 B 입장에서는 $+x$ 방향으로 $\frac{f_0}{4}$ 가 사라지고 다시 $+x$ 방향으로 f_0 가 생겼으므로 결국 $+x$ 방향으로 $\frac{3}{4}f_0$ 가 생긴 것이다. 이때 B의 알짜힘은 $-x$ 방향으로 F 에서 $+x$ 방향으로 $2F$ 가 되었으므로 결국 $+x$ 방향으로 $3F$ 가 변한 것이니 $f_0 = 4F$ 임을 알 수 있다.

따라서 (나)에서 C가 B에 작용하는 힘이 $+x$ 방향 $4F$ 인데, 실제 알짜힘은 $+x$ 방향 $2F$ 이므로 A와 B가 d 만큼 떨어져 있을 때 서로 작용하는 전기력의 크기는 $2F$ 임을 알 수 있다. 따라서 전하량의 크기는 $C > A$ 이다.

이를 토대로 작용/반작용의 법칙을 이용해 (가) 그림의 모든 힘을 표시하면 다음과 같다.



C로부터 떨어진 거리는 A가 B보다 멀어도 C가 받는 전기력의 방향을 A가 결정하는 것으로 보아, 전하량의 크기는 $A > B$ 임을 알 수 있다. 따라서 전하량의 크기는 $C > A > B$ 이다.

예제(4) 20학년도 6월 평가원 14번

그림과 같이 점전하 A, B가 각각 $x=0$, $x=3d$ 에 고정되어 있다. A는 음(-)전하이다. 양(+) 전하를 띤 입자 X의 위치를 바꾸어 가며 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 고른 것은?

<보 기>

- 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.

문제가 상당히 어렵다. 이제까지 배운 것들을 다양하게 섞어서 풀어야 하는 문제이므로 천천히 따라가보자. 이 문제는, 문제만 보고서 필연적으로 시작되는 0번을 떠올리기가 쉽지 않다. 따라서 0번 없이 <보기>의 ㄱ을 먼저 보고 풀이를 결정하는 게 맞다고 생각하기에 해설을 1번부터 시작한다.



1. A와 B의 전하량 크기 비교하기

문제에서 주어진 조건에 따르면 $F_3 > F_1$ 인데, 만약 A의 전하량의 크기가 B와 같거나 B보다 크다면 이에 모순이 발생한다. 따라서 B의 전하량의 크기는 A보다 크다. (ㄱ 맞음)

(1번 보충 설명) 대소비교가 헷갈릴 때, **같을 때를 가정해서 문제의 조건에 맞게 조정해나가면 좀 더 쉽게 풀릴 때가 있다.** 이 문제에서도 해설의 1번 부분이 이해가 안 된다면, A와 B의 전하량의 크기가 같을 때를 생각해보자. 그러면 $F_1 = F_3$ 이 자명하다.

이때 $F_3 > F_1$ 이 되려면 둘의 전하량의 크기를 어떻게 조정해야 할까?
B의 전하량의 크기가 A보다 커지면 될 것이다.

2. 변화량 풀이 이용하기

양(+)전하를 띠는 입자 X가 $x = -d$ 에 있을 때와 $x = d$ 에 있을 때 A가 X에 가하는 전기력의 크기는 같으므로, F_1 과 F_2 의 크기 차이는 점전하 B가 만든 것임을 알 수 있다. (쉽게 말해, X 입장에서 변한 것은 B에게 받는 힘뿐이다.)

B가 X에 가하는 전기력의 방향이 A가 X에 가하는 전기력의 방향과 일치할 때 X가 받는 알짜힘의 세기가 가장 세질 것이므로, $F_2 > F_1$ 에서 B는 양(+)전하이다.

(2번 보충 설명) B의 전하량의 크기가 A에 비해 어어어엄청나게 커서 B와 가까운 $x = d$ 에서 X가 받는 전기력의 세기 F_2 가 멀리 떨어진 F_1 보다 큰 것도 가능하지 않냐는 의문이 생길 수 있다. 하지만 이런 경우에는 B와 가장 가까운 $x = 4d$ 의 F_3 의 세기가 가장 세야 하는데, 이는 $F_2 > F_3$ 이라는 문제 조건에 모순이다.

3. 평형점 찾기

A와 B의 전하의 부호가 반대이고 B의 전하량이 더 큰 경우이므로, 평형점은 A의 $-x$ 방향에 생긴다. (ㄴ 틀림)

4. c선지 풀이

1) 논리적 풀이

c은 평형점이 $x = -d$ 의 어느 쪽에 위치하는지를 찾으면 풀리므로, 해설 1번 보충 설명에서 했듯이 먼저 $x = -d$ 가 평형점일 경우를 가정해보자. 이 경우, B의 전하량의 크기는 A의 16배이다.

그런데 이렇게 되면 앞서 2번 보충 설명과 같이, B의 전하량의 크기가 A에 비해 너무 커져서 $F_3 > F_2$ 가 되어버리는 문제가 발생한다. 따라서 A의 전하량의 16배는 B의 전하량보다는 커야 하므로 평형점은 $x = -d$ 의 $-x$ 방향에 존재한다.

다시 말해 $x = -d$ 에서는 입자 X가 받는 전기력의 방향에 더 큰 영향을 미치는 전하가 A이므로, $x = -d$ 에서 X에 작용하는 전기력의 방향은 $+x$ 방향이다. (c 틀림)

2) 수식적 풀이

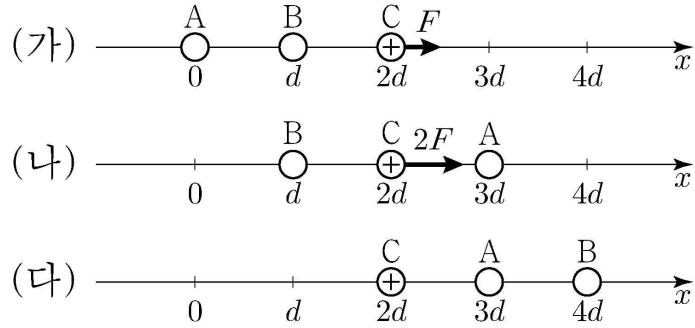
A와 B가 거리 d 만큼 떨어진 채 X에 작용하는 전기력의 크기를 각각 f_A, f_B 라 하자. 문제의 조건에 따라 $F_2 > F_3 > F_1$ 이므로, 풀어서 나타내면 $f_A + \frac{1}{4}f_B > f_B - \frac{1}{16}f_A > |f_A - \frac{1}{16}f_B|$ 이다.

여기서 $F_2 > F_3$ 을 보면 $f_A > \frac{12}{17}f_B > \frac{1}{9}f_B$ 임을 알 수 있고, F_1 의 방향에 A가 더 큰 영향을 미친다는 걸 알 수 있다. 따라서 F_1 의 방향은 $+x$ 방향이다. (c 틀림)

정답 : ㄱ

예제(5) 21학년도 9월 평가원 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 방향으로 옳은 것은?

- | | <u>크기</u> | <u>방향</u> | | <u>크기</u> | <u>방향</u> |
|---|---------------|-----------|---|---------------|-----------|
| ① | $\frac{F}{2}$ | $+x$ | ② | $\frac{F}{2}$ | $-x$ |
| ③ | F | $+x$ | ④ | F | $-x$ |
| ⑤ | $2F$ | $+x$ | | | |

3. B가 A를 당기는 힘의 크기 구하기

아직 안 쓴 조건이 하나 남아있다. (가)에서 A가 받는 알짜힘의 크기가 $2F$ 라는 것인데, 이것 이용하는 방법은 두 가지이다. 둘 다 매우 중요한 관점이므로 받아들이려 노력해보자.

(1) 단일 전하 관점

우선 C에 의해서 A는 $+x$ 방향으로 $\frac{1}{5}F$ 의 세기로 당겨진다. 이때 A와 B 사이에는 인력이 작용하므로, B가 A를 $\frac{9}{5}F$ 로 당기고 있음을 알 수 있다.

(2) 전체 계 관점

(가)에서 B와 C가 모두 양(+)전하이므로, 이들의 왼쪽에 있는 음(-)전하 A에 작용하는 전기력의 방향은 $+x$ 방향이다. 따라서 A, B, C를 모두 하나의 계로 볼 때 외부력은 없으므로 합력이 0인 것을 생각하면 B에 작용하는 전기력은 $-x$ 방향으로 $3F$ 이다. B는 C를 $+x$ 방향으로 $\frac{6}{5}F$ 의 힘으로 밀어내므로, 따라서 A가 B를 $-x$ 방향으로 당기는 힘의 크기는 $\frac{9}{5}F$ 이다.

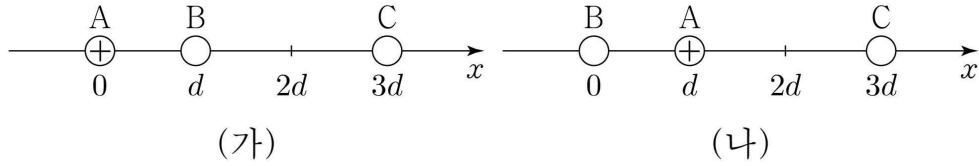
3. 정답 결정하기

이제 (다)를 보면 C가 A를 $-x$ 방향으로 $\frac{4}{5}F$ 만큼, B가 A를 $+x$ 방향으로 $\frac{9}{5}F$ 만큼 당기고 있음을 알 수 있다. 따라서 정답은 $+x$ 방향 F 이다.

정답 : ③

예제(6) 22학년도 6월 평가원 19번

그림 (가)는 x 축 상에 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(+전하)이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

〈 보 기 〉

- 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.



0. 문제 상황 파악하기

(가)에서 A와 B가 외부에 만드는 평형점에 C가 위치한다. 따라서 A와 B의 부호는 반대이므로 B는 음(-)전하이므로, 평형점으로부터 B보다 A가 더 멀리 위치하므로 전하량의 크기는 $A > B$ 이다.

또한 (가)에서 A가 B를 $-x$ 방향으로 당기는데도 B가 받는 전기력의 방향이 $+x$ 방향이므로, C는 양(+)전하이므로. 이때 C가 A보다 B로부터 멀리 떨어져 있음에도 B에 더 많은 전기력을 가하는 것을 보아, 전하량의 크기가 $C > A$ 임을 알 수 있다. 따라서 전하량의 크기는 $C > A > B$ 이다. (ㄱ 맞음)

1. (가)에서 계 내부의 상호작용은 상쇄됨을 이용하기

(가)에서 A, B, C 전체를 하나의 계로 보면, 전체 전하가 받는 합력은 0이 되어야 한다. 따라서 B가 받는 전기력이 $+x$ 방향이고 C가 받는 전기력은 0이므로, A가 받는 전기력은 $-x$ 방향이다. (나)에서 B와 C는 모두 A에 $-x$ 방향의 전기력을 가하므로, A가 받는 전기력은 $-x$ 방향이다. (ㄴ 맞음)

2. (나)에서 계 내부의 상호작용은 상쇄됨과 변화량 이용하기

(나)에서 A가 받는 전기력의 방향은 $-x$ 방향이고, B가 받는 전기력의 방향은 $+x$ 방향이다. 따라서 C가 받는 전기력의 방향을 찾으면, A와 B가 받는 전기력의 크기를 비교할 수 있다.

그런데 (나)에서 C의 전기력 방향을 곧바로 찾을 방법이 떠오르지 않는다. 이럴 때는 (가)에서의 C를 통해 (나)에서 C를 간접적으로 알아내야 한다.

(가)에서 C가 받는 전기력은 0인데, (가)→(나)에서 C를 보면 $+x$ 방향으로 밀어주는 A는 가까이 왔고 $-x$ 방향으로 당겨주는 B는 멀어졌다. 따라서 (나)에서 C가 받는 전기력의 방향은 $+x$ 방향이다.

B와 C에 작용하는 $+x$ 방향 전기력과 A에 작용하는 $-x$ 방향 전기력의 합이 0이다. 따라서 A에 작용하는 전기력의 크기가 B에 작용하는 전기력의 크기보다 크다. (ㄷ 맞음)

정답: ㄱ, ㄴ, ㄷ

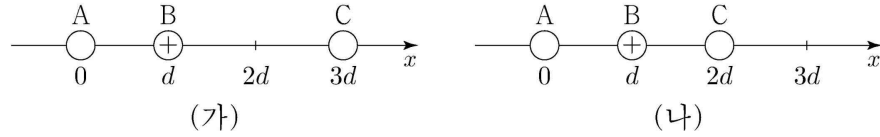
3. ㄱ, ㄷ 선지를 다른 관점으로 해결하기

앞서 전하량의 크기를 묻는 선지가 나오면 나머지 점전하를 보라 했는데, ㄱ을 보면 B와 C의 전하량 크기를 비교하고 있다. 따라서 (가)의 A가 받는 전기력을 보자. B가 A에 작용하는 전기력의 방향이 $+x$ 방향임에도 A가 받는 전기력이 $-x$ 방향임을 이용하면, 멀리 떨어진 C의 영향이 굉장히 큰 것을 찾을 수 있다. 전하량의 크기가 $C > B$ 임을 이렇게도 알 수 있다. (ㄱ 맞음)

A와 B가 서로에게 작용하는 전기력은 작용-반작용으로 같은데, 안 그래도 B보다 전하량이 큰 A가 C와 더 가까이 있다. 따라서 A에 작용하는 전기력의 크기가 B에 작용하는 전기력의 크기보다 큰 것을 이렇게도 알 수 있다. (ㄷ 맞음)

예제(7) 22학년도 9월 평가원 19번

그림 (가)는 점전하 A, B, C를 x 축 상에 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 고른 것은?

<보 기>

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



0. 문제 상황 파악하기

(가)에서 C에 작용하는 전기력이 $+x$ 방향인데, 이 조건 하나만으로는 알 수 있는 게 없다. 따라서 우리는 (나) 조건을 살펴보아야 한다.

(나)에서 C의 위치가 $x = 2d$ 일 때 B와 C가 만드는 평형점에 A가 위치하므로, C가 음(-)전하인 걸 알 수 있다. 또한 C에 작용하는 전기력이 $-x$ 방향이므로, 합력이 0이 되기 위해 B에 작용하는 전기력은 $+x$ 방향이여야 한다.

1. (나)→(가)에서 변화량 이용하기

(나)→(가)로 변하면서 C가 받는 전기력의 방향이 변한다. 전기력의 방향은 평형점을 기점으로 변하기 때문에, $2d$ 와 $3d$ 사이에 A와 B가 만드는 평형점이 존재해야 한다. 따라서 A는 음(-)전하이므로, B보다 A의 전하량의 크기가 크다. (ㄱ 맞음)

(나)에서 A에 작용하는 전기력이 0이기 때문에, (나)를 기준으로 변하는 (나)→(가)의 상황을 생각하는 게 편하다. 이때 A로부터 C가 멀어지면서 A에 $-x$ 방향으로 작용하는 전기력이 줄어들기 때문에, (가)에서 A에 작용하는 전기력이 $+x$ 방향이 된다.

그런데 (가)에서 C에 작용하는 전기력도 $+x$ 방향이므로, 전체 내부력이 상쇄됨을 이용하면 (가)에서 B에 작용하는 전기력은 $-x$ 방향이여야 한다. (ㄷ 틀림)

2. L선지 해결하기

L을 보면 A와 C의 전하량 크기를 비교하고 있다. 따라서 나머지 전하인 B에 작용하는 전기력을 확인해보자.

(나)에서 B로부터 A와 C가 같은 거리만큼 떨어져 있는데, B에 작용하는 전기력이 $+x$ 방향이다. 따라서 C의 전하량이 A보다 큰 것을 확인할 수 있다. (L 틀림)

정답: ㄱ