

Key 1. 흥분의 전도와 전달

[막전위 - 개괄]

막전위의 현상에 대한 이해만을 가지고는 절대 평가원에서 나오는 막전위 문제들을 시간 내에 풀어낼 수 없다. 개념적인 부분과 실전적인 풀이법의 간극이 큰 파트들은 실전에서 출제하는 형식에 맞춰서 연습해야 한다. 특히 이 간극은 준킬러와 킬러 파트에서 발생하는데, **개념과 실전의 간극을 최대한 줄일 수 있는 사고 방식을 소개**하는 것이 이 Key 파트의 주요 목적이다. **Key 파트**에서는 논리, 표기법, 판단 기준 등 문제를 풀면서 할 수 있는 가장 효율적인 사고 방식에 대해서 담고자 노력했다.

15. 다음은 민말이집 신경 I~Ⅲ의 흥분 전도와 전달에 대한 자료이다.

○ 그림은 I~Ⅲ의 지점 $d_1 \sim d_5$ 의 위치를, 표는 ㉠ I과 II의 P에, Ⅲ의 Q에 역치 이상의 자극을 동시에 1회 주고 경과된 시간이 4ms일 때 $d_1 \sim d_5$ 에서의 막전위를 나타낸 것이다. P와 Q는 각각 $d_1 \sim d_5$ 중 하나이다.

신경	4ms일 때 막전위(mV)				
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
I	-70	㉠	?	㉡	?
II	㉢	㉠	?	㉣	㉤
III	㉢	-80	?	㉠	?

○ I을 구성하는 두 뉴런의 흥분 전도 속도는 $2v$ 로 같고, II와 III의 흥분 전도 속도는 각각 $3v$ 와 $6v$ 이다.

○ I~III 각각에서 활동 전위가 발생하였을 때, 각 지점에서의 막전위 변화는 그림과 같다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, I~III에서 흥분의 전도는 각각 1회 일어났고, 휴지 전위는 -70mV 이다.) [3점]

<보 기>

ㄱ. Q는 d_4 이다.
 ㄴ. II의 흥분 전도 속도는 2cm/ms 이다.
 ㄷ. ㉠이 5ms일 때 I의 d_5 에서 재분극이 일어나고 있다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

위 그림은 23학년도 수능에 나왔던 막전위 문제이다. 문제의 형식과 정보들만 봐도, 개념적 이해만으로는 문제를 시간 내에 풀어낼 수 없어 보인다. 약간 수학과 비슷한 개념이다. 우리가 수학의 개념을 안다고 해서 모든 문제를 풀어낼 수 있는 것은 아닌 것처럼, 우리가 막전위라는 개념을 안다고 해서 이러한 문제를 풀어낼 수는 없다. 또한 현장에서는 심지어 “빠르게” 풀어내야 한다. 이번 단원을 통해서 어떻게 막전위 문제를 풀어내야 할지, 어떠한 태도를 가져야 할지를 고민해보며 문제를 풀어보도록 하자.

[막전위 - 표기법]

15. 다음은 민말이집 신경 A~C의 흥분 전도에 대한 자료이다.

○ 그림은 A~C의 지점 d_1 으로부터 세 지점 $d_2 \sim d_4$ 까지의 거리를, 표는 ㉠ 각 신경의 d_1 에 역치 이상의 자극을 동시에 1회 주고 경과된 시간이 3ms일 때 $d_1 \sim d_4$ 에서 측정된 막전위를 나타낸 것이다. I~III은 A~C를 순서 없이 나타낸 것이다.

신경	3ms일 때 측정된 막전위(mV)			
	d_1	d_2	d_3	d_4
I	-80	?	-60	?
II	?	-80	?	-70
III	?	?	+30	-60

○ A의 흥분 전도 속도는 2cm/ms이다.
 ○ 그림 (가)는 A와 B의 $d_1 \sim d_4$ 에서, (나)는 C의 $d_1 \sim d_4$ 에서 활동 전위가 발생하였을 때 각 지점에서의 막전위 변화를 나타낸 것이다.

이 자료에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, A~C에서 흥분의 전도는 각각 1회 일어났고, 휴지 전위는 -70mV이다.) [3점]

<보기>

ㄱ. 흥분의 전도 속도는 C에서 A에서보다 빠르다.
 ㄴ. ㉠이 3ms일 때 I의 d_2 에서 K^+ 은 K^+ 통로를 통해 세포 밖으로 확산된다.
 ㄷ. ㉠이 5ms일 때 B의 d_4 와 C의 d_4 에서 측정된 막전위는 같다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

<문제 풀기 전>

위 두 그림은 [19.11.15] 막전위 문제의 원본과 필자가 풀어진 이후의 그림을 가지고 왔다. 두 이미지를 비교하면서 “막전위 문항에서는 어떠한 정보들을 알아내야 하는지”부터 정리하고 가자. 동시에 필자가 사용하는 표기법에 대해서도 설명하겠다.

(1) 각 신경의 전도 속도

그림을 보면 원 안에 숫자(②, ③)가 보일 것이다. 이는 신경의 전도 속도를 나타내는 표기이며, $v=2$ 로 표기해도 좋다. 그리고 문제를 풀다가 자극지점을 알아내면 자극지점

15. 다음은 민말이집 신경 A~C의 흥분 전도에 대한 자료이다.

○ 그림은 A~C의 지점 d_1 으로부터 세 지점 $d_2 \sim d_4$ 까지의 거리를, 표는 ㉠ 각 신경의 d_1 에 역치 이상의 자극을 동시에 1회 주고 경과된 시간이 3ms일 때 $d_1 \sim d_4$ 에서 측정된 막전위를 나타낸 것이다. I~III은 A~C를 순서 없이 나타낸 것이다.

신경	3ms일 때 측정된 막전위(mV)			
	d_1	d_2	d_3	d_4
A I	-80	?	-60	?
B II	?	-80	?	-70
C III	?	?	+30	-60

○ A의 흥분 전도 속도는 2cm/ms이다.
 ○ 그림 (가)는 A와 B의 $d_1 \sim d_4$ 에서, (나)는 C의 $d_1 \sim d_4$ 에서 활동 전위가 발생하였을 때 각 지점에서의 막전위 변화를 나타낸 것이다.

이 자료에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, A~C에서 흥분의 전도는 각각 1회 일어났고, 휴지 전위는 -70mV이다.) [3점]

<보기>

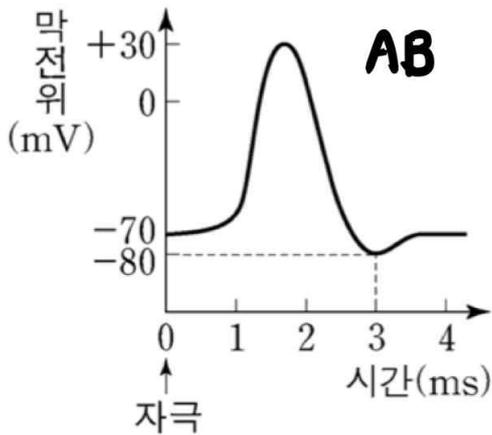
ㄱ. 흥분의 전도 속도는 C에서 A에서보다 빠르다.
 ㄴ. ㉠이 3ms일 때 I의 d_2 에서 K^+ 은 K^+ 통로를 통해 세포 밖으로 확산된다.
 ㄷ. ㉠이 5ms일 때 B의 d_4 와 C의 d_4 에서 측정된 막전위는 같다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

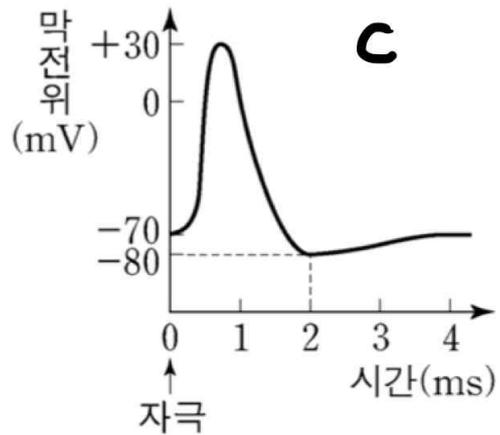
<문제 풀이 후>

에 v 표시를 하였다. 위의 경우 d_1 에 자극을 줬다고 할 수 있겠다.

(2) 각 신경의 막전위 그래프



(가)



(나)

모든 신경이 시간에 따라서 완벽하게 똑같은 막전위 양상을 그리는 것은 아니기에, 신경마다 가지는 막전위 그래프는 다를 수 있다. 각 신경마다의 막전위 그래프가 다를 경우, 막전위 그래프 위에 해당하는 신경을 적어준다.

따라서 그림에서 나타난 표기법을 해석하자면 A, B는 왼쪽 막전위 그래프를 C는 오른쪽 막전위 그래프를 그려내고 있는 의미 정도로 받아들이면 된다. 이 문제의 경우 순서대로 (가)가 A와 B, (나)가 C였지만 순서가 엉망으로 뒤바뀌는 경우도 존재하기에, 혼동하지 않기 위해서 필기하는 습관을 들이자.

(3) 각 신경의 지점별 막전위 표

신경	3 ms일 때 측정된 막전위(mV)			
	d_1	d_2	d_3	d_4
A I	-80 0/3	?	-60 2/1	?
C II	?	-80 1/2	?	-70
B III	?	?	+30	-60 ↑ 2/1

위의 그림은 3ms일 때 관찰한 각 신경의 지점별 막전위를 나타낸 표이다. 보통 신경 또는 지점들을 기호 I~IV 등으로 숨기는 경우가 많은데, 표를 해석하는 것에 차질이 발

생하지 않도록 각 기호가 무엇인지 알아냈다면 표에 바로 기록하는 것이 좋다. 위의 경우 신경 I~III이 각각 A, C, B인 점을 알아내서 기록한 것이라고 할 수 있다.

표를 살펴보면 슬래쉬 '/'기호와 함께 양옆에 숫자가 기록되어 있다. "0/3"과 같은 표기를 이해하기 위해서는 먼저 전체 시간, 앞 시간(전도 시간), 뒷 시간(막전위 변화 시간)이라는 개념을 이해해야 한다.

우리는 먼저 신경의 자극지점에 자극을 준다. 외부 자극은 탈분극을 일으키고 이는 양옆으로 전도된다.

i) 앞 시간 개념

자극 지점이 아닌 다른 곳에서 탈분극이 시작되기 위해서는 자극지점으로부터 시작된 탈분극이 신경 전도를 통해서 다른 지점까지 도달해야하는데, 자극 지점에서 다른 지점까지 자극이 전도되는데 시간이 걸릴 것이고 이를 우리는 앞 시간이라고 부른다.

ii) 뒷 시간 개념

특정 지점에 전도를 통해 자극지점의 자극이 도달하면(앞시간 소요), 자극이 도달한 지점에서 탈분극, 재분극, 분극 과정이 막전위 그래프 양상을 따라 시간에 따라서 변할 것이다. 막전위 그래프 양상대로 막전위가 변화가능한 시간이 뒷 시간이다. 예를 들어서 특정 지점의 뒷시간이 3ms라면, 그래프에서 3ms인 지점의 막전위를 우리는 관찰하게 될 것이다.

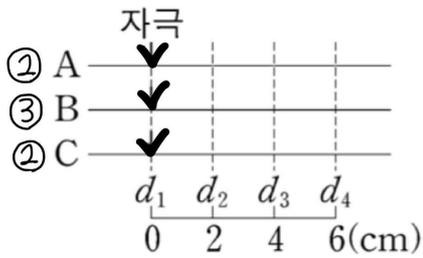
iii) 전체 시간 개념

우리는 무한한 시간동안 각 지점의 막전위를 측정하는 것이 아닌, 오직 "특정 순간"만을 막전위를 측정한다. 이 특정 순간을 측정하기까지 자극을 주고 기다리는 시간이 전체 시간이며, 전체 시간 동안 자극의 전도와 막전위의 변화가 각 지점에서 일어나는 것이다. 즉, 전체 시간은 앞 시간과 뒷 시간으로 구성된다.

$$\text{전체 시간} = \text{앞 시간} + \text{뒷 시간}$$

보통 막전위를 측정하는 시간(전체 시간)은 문제에서 제공하며, 위 문제에서는 "3ms일 때 막전위를 측정했다"라고 되어 있으니 전체 시간이 3이라고 보면 된다.

그러면 막전위 표를 보면서 각 지점에서의 표기가 어떤 의미를 가지는지 한 번 파악해보자.



신경	3 ms일 때 측정된 막전위(mV)			
	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄
A I	-80 <i>이/3</i>	?	-60 <i>2/1</i>	?
C II	?	-80 <i>1/2</i>	?	-70
B III	?	?	+30	-60↑ <i>2/1</i>

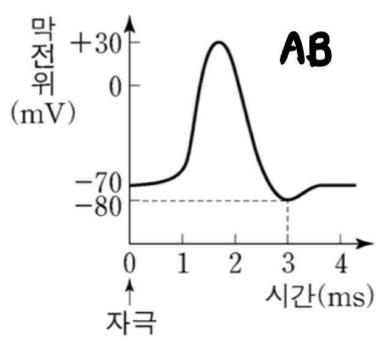
III(B)신경을 예시로 보자. B 신경의 전도 속도는 3이며 전체 시간이 3이라고 하였다.

신경 B의 지점 d₄는 자극 지점 d₁으로부터 거리가 6만큼 떨어져있다. B의 속도는 3이니 전도에 걸린 시간, 앞 시간은 $\frac{6}{3}=2$ 이다.

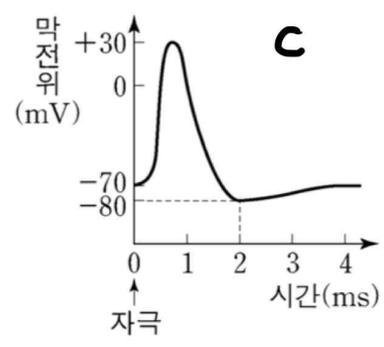
전체 시간(관측하는 시간) = 앞 시간(전도에 걸린 시간) + 뒷 시간(막전위 변화 시간)

식에 전체 시간과 앞 시간을 넣으면 3 = 2 + 뒷 시간

따라서 뒷 시간이 1이라는 것을 알 수 있다. 지금부터 우리는 이것을 "2/1"로 표기한다. 즉, 전도에 시간을 사용했는데도 시간이 1초가 남았으니, 남은 1초는 뒷 시간으로 넘어가 1초 동안 막전위 그래프를 따라가며 -60이라는 막전위를 가진다. 또한 (가) 그래프에서 1초의 막전위를 확인해보아도 대략적으로 -60정도에 위치하는 것을 알 수 있다.



(가)



(나)

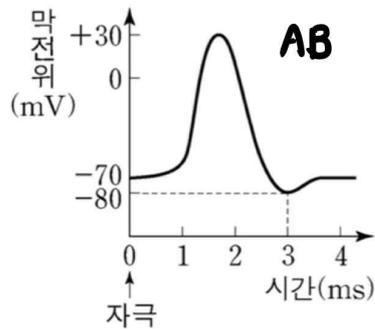
그래프의 모양을 살펴보면 -60이라는 막전위는 탈분극과 재분극에 모두 존재해서 어떤 지점의 -60인지 헷갈릴 여지가 많다. 실제로 평가원에서 고의로 같은 -60을 여러 개 넣어서 대다수의 학생들이 "에이, 같은 뒷 시간의 막전위겠지"라며 같은 상태의 막전위라고 가정하고 문제를 풀었으나, 실제로 풀어보면 하나는 탈분극, 하나는 재분극 상태에서의 -60인 경우도 있었다. 따라서 특정한 숫자가 나오면 필자처럼 화살표 표시를 통해서 탈분극 상태와 재분극 상태를 구분해주는 것이 좋다.

신경	3 ms일 때 측정된 막전위(mV)			
	d_1	d_2	d_3	d_4
A I	-80 <i>1/3</i>	?	-60 <i>2/1</i>	?
C II	?	-80 <i>1/2</i>	?	-70
B III	?	?	+30	-60 <i>2/1</i> ↑

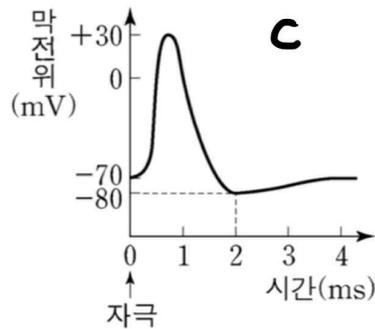
↑ 방향 화살표는 막전위 그래프에서 상승 중, 즉 일반적으로 탈분극을 나타내고

↓ 방향 화살표는 막전위 그래프에서 하락 중, 즉 재분극을 나타낸다.

그래서 위의 막전위 표에서 -60은 2/1로 탈분극 상태이기에 ↑ 방향 화살표를 넣은 것이다.



(가)



(나)

하지만 조심해야 할 지점이 존재하는데, 바로 **과분극 지점**이다. 과분극 지점에서는 끝 부분에 막전위가 올라감에도 불구하고, 탈분극 구간이 아닌 **재분극 구간으로 분류**한다. 따라서 **과분극 지점에서의 화살표를 표기**할 때도 역시나 그래프에서 상승하는지, 하락하는지에 따라서 ↑, ↓를 표기하면 되는데, 다만 문제를 서둘러서 풀다가 과분극 지점의 ↑를 보고 탈분극이라고 판단하는 일은 없어야겠다.

다행히도 보통 문제에서 과분극 지점이 여러 개 나오는 경우는 잘 존재하지 않는다. 과분극 지점에 화살표를 표기하는 이유는, 우리가 같은 값의 막전위 상태들을 구분하기 위한 것처럼 과분극 지점 간의 구분을 위해서 진행하는 것인데, 과분극 지점들을 구분해야 할 문제가 잘 존재하지 않는다. 따라서 필요한 경우에만 위 사실을 인지하고, 과분극 지점에도 화살표를 표기하며 문제를 풀어내면 되겠다.

[막전위 - 기본 이해]

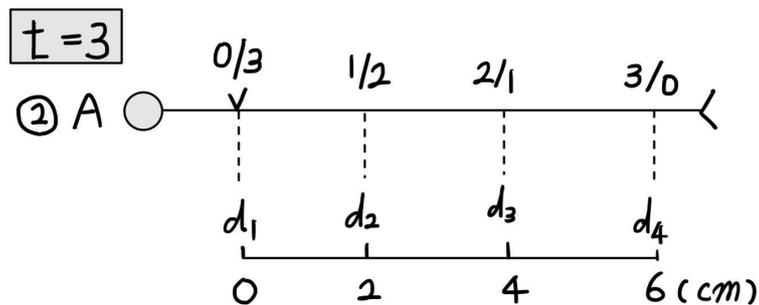
막전위 문항들을 풀어내기 위해서는 전도 속도, 시간, 지점 거리 간의 관계를 이해할 필요가 있다. 그 관계성으로부터 활용할 수 있는 주요한 특징들을 살펴보자.

(1) 측정 지점이 자극 지점에서 가까울수록 지점에서 나타나는 막전위는 그래프에서 뒤에 위치한다.

측정 지점이 자극 지점에서 가깝다는 말은, 전도를 통해 도달하는 시간(앞 시간)이 줄어든다는 의미이다.

$$\text{전체 시간} = \text{앞 시간} \downarrow + \text{뒷 시간} \uparrow$$

앞 시간이 줄어들면, 자연스럽게 전체 시간 중 뒷 시간으로 활용 가능한 시간이 많아진다. 뒷 시간이 늘어나면, 막전위 그래프를 따라서 변화하는 시간이 많다는 뜻이니 관측 지점의 막전위는 그래프에서 (시간상으로) 뒤쪽에 위치하게 된다.



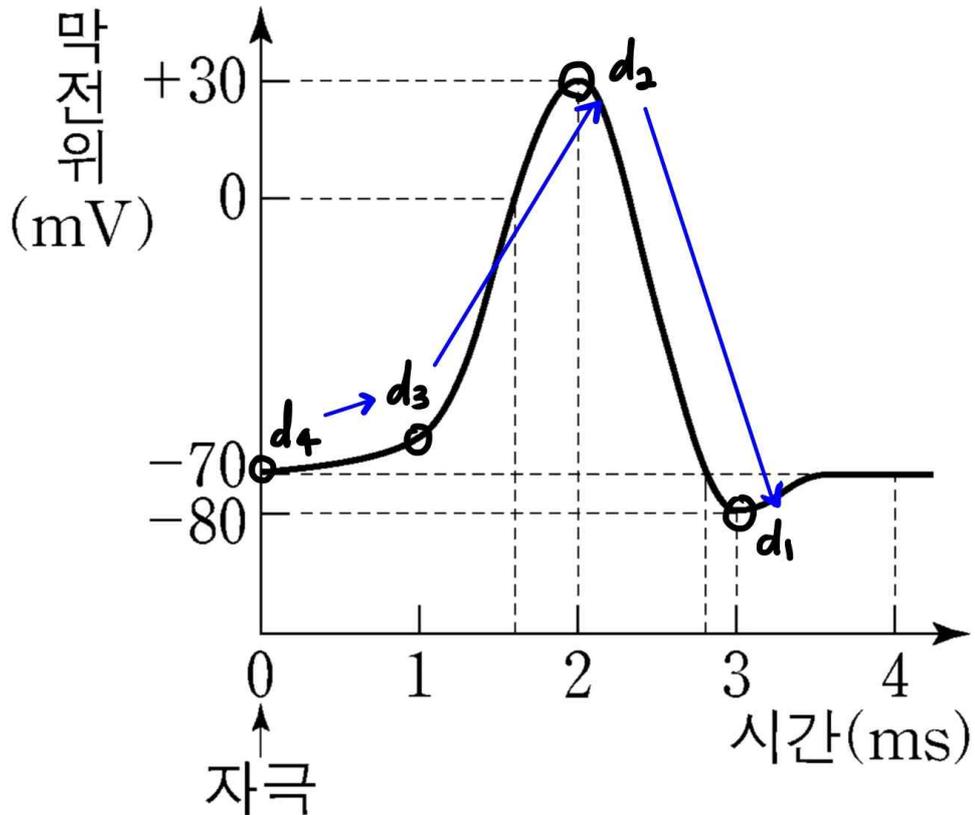
전체 시간이 3인 상황에서 전도 속도가 2인 신경 A의 d_1 에 자극을 주었을 때, 각 지점의 막전위를 관찰해보자.

신경 A의 전도 속도는 2이기에 각 지점에 도달하는데 걸리는 시간은 $\frac{\text{거리}}{\text{전도 속도}} = \frac{\text{거리}}{2}$ 일 것이다. 따라서 지점 d_1, d_2, d_3, d_4 각각에 도달하기 위해서는 0, 1, 2, 3초가 걸리고 이 시간이 각 지점이 가지는 “앞 시간”이라고 할 수 있다.

자극 지점에서 멀어질수록 앞 시간은 커지고 있다. 전도를 통해서 멀리까지 이동해야하기에 소모하는 시간이 많아지기 때문이다.

전체 시간이 3이니, 지점 d_1, d_2, d_3, d_4 의 뒷 시간은 자연스럽게 3, 2, 1, 0초가 된다. (전체 시간 = 앞 시간 + 뒷 시간)

자극 지점에서 멀수록 뒷 시간은 작아지고 있다. 전체 시간 중 앞 시간의 소모값이 커지기 때문이다. 이를 반대로 말하면, 자극 지점에서 가까울수록 뒷 시간은 커지고 있고 막전위 변화에 많은 시간을 할애할 수 있다는 것이다.



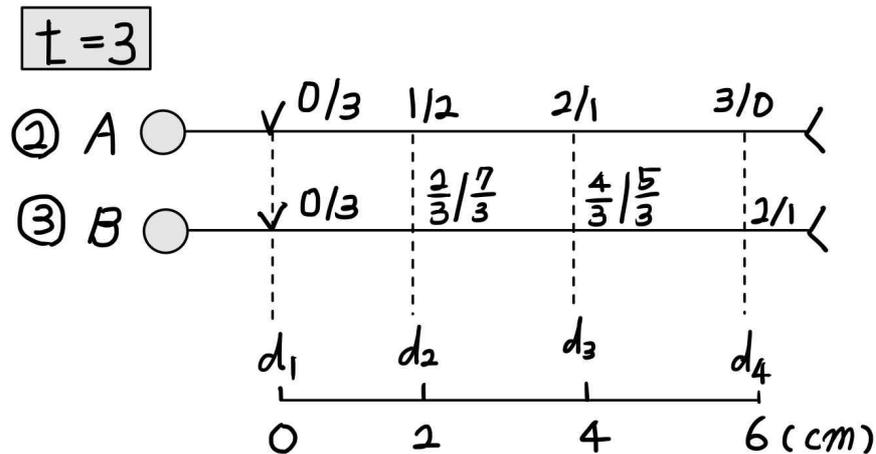
따라서 그래프에서 각 지점의 막전위 상태를 찾아보면, 자극 지점에서 가까울수록 막전위 그래프 상에서 뒤쪽에 위치하게 된다.

그렇다면 역으로 같은 신경의 막전위 값들을 보았을 때, 그래프 상에서 어떤 쪽에 위치하느냐에 따라서 자극 지점으로부터 얼마나 가까운지 추론할 수 있겠다.

예를 들어서 하나의 신경 내에서 막전위를 측정했을 때, 막전위 -80과 막전위 -60이 있다고 해보자. -80은 반드시 과분극 지점 쪽에서만 발생하니 반드시 막전위 -60보다 그래프 상에서 뒤쪽에 위치한다. 따라서 막전위 -80을 나타내는 지점이 막전위 -60을 나타내는 지점보다 자극 지점에서 가깝다고 추론할 수 있다.

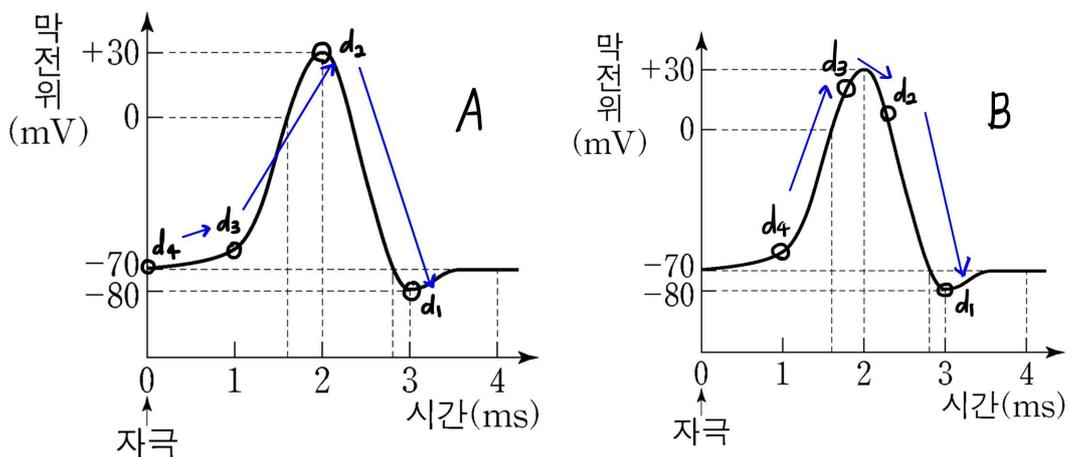
(2) 신경의 전도속도가 빠를수록 지점들의 막전위는 그래프에서 뒤에 위치한다.

이번에는 하나의 신경이 아닌, 여러 개의 신경을 살펴보자. 일반적으로 신경들의 전도 속도가 다른 상황이나 신경들의 자극 지점이 다른 상황을 출제하고 싶을 때 여러 개의 신경을 제시한다.



전도 속도가 2인 신경 A와 전도 속도가 3인 신경 B가 존재한다. 두 신경의 지점 d_1 에 자극을 주고 전체 시간이 3일 때 각 지점에서의 막전위를 측정했다고 해보자.

속도가 빠를수록 같은 거리를 이동하는데 걸리는 시간이 줄어든다. 즉, 전도 속도가 빠를수록 앞 시간은 줄어들 것이며 자연스럽게 뒷 시간은 늘어나 막전위 그래프 상에서 뒤쪽에 위치하게 된다. 결론적으로 신경의 전도속도가 빠를수록 지점들의 막전위 값은 전체적으로 그래프 뒤쪽으로 쏠리게 된다. 실제로 신경 A와 B의 뒷 시간을 각 지점마다 비교해보면 자극 지점을 제외하고는 모두 전도 속도가 빠른 B가 더 뒷 시간이 더 크다.



따라서 전체적으로 신경 A에 비하면 신경 B의 막전위가 그래프 상에서 뒤쪽에 위치한다는 것을 알 수 있을 것이다.

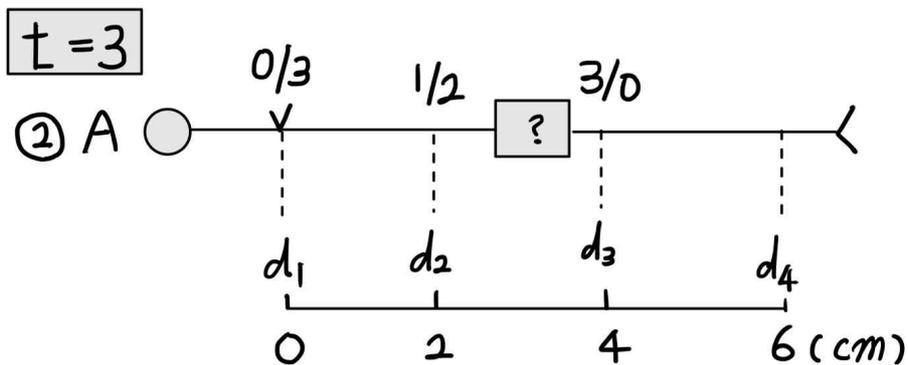
그렇다면 역으로 두 신경의 같은 지점에서 막전위를 측정했을 때, 그래프 상에서 어떤 쪽에 위치하느냐에 따라서 어떤 신경의 전도 속도가 빠르지 추론할 수 있겠다.

예를 들어서 두 신경의 지점 d_3 에서 각각 막전위를 측정했을 때, 신경 A의 막전위는 -80 , 신경 B의 막전위는 -60 이라고 해보자. -80 은 반드시 -60 보다 그래프 상에서 뒤쪽에 위치한다. 따라서 동일 지점 d_3 막전위 -80 을 나타내는 신경 A가 막전위 -60 을 나타내는 신경 B보다 신경 전도 속도가 빠르다고 추론할 수 있다.

(3) 전달 속도와 전달의 일방향성

개념적으로 배운 내용과 같이 전도 속도는 전달 속도보다 빠르며, 전도는 양방향성으로 일어나는 반면 전달은 한쪽으로만 일어난다.

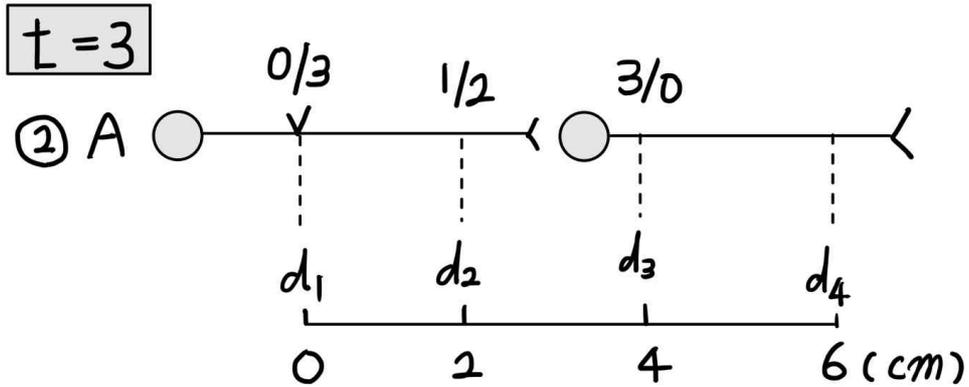
i) 전달 속도는 전도 속도보다 느리다.



충분 전도 속도가 2인 신경 A의 지점 d_1 에 자극을 주고, 각 지점에서의 막전위를 전체 시간이 3일 때 측정했다고 해보자. 동시에 $?$ 에는 시냅스가 존재할 수도 있다고 한다. 이후 막전위 측정결과, d_3 에서의 뒷 시간이 3이라는 결론이 나왔다고 해보자.

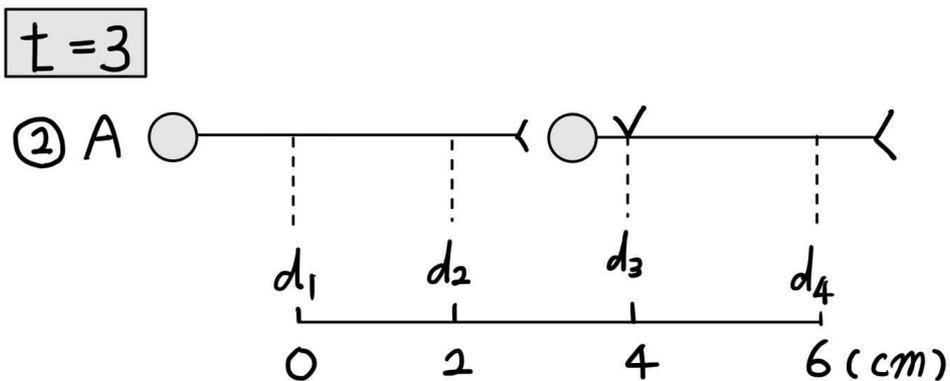
만약, 시냅스가 존재하지 않는다면 d_3 에서의 막전위는 $2/1$ 로 나타날 것인데, 그렇지 않다. 전도만으로는 앞 시간 3을 모두 사용할 수 없다.

따라서 전도뿐만 아니라 전달이 존재해야하며, 전달의 속도는 전도보다 느리기에 충분히 앞 시간 3을 사용할 수 있다. 따라서 $?$ 에는 시냅스가 존재한다.



결국 시냅스 덕분에 전달에 시간이 더 사용되어, d_3 까지 도달하는데 앞 시간이 더 사용될 수 있는 것이다. 이처럼 전달을 거치면 전도만을 거쳤을 때에 비해서 앞 시간이 커진다는 특징을 이용하여 특정 지점에 시냅스가 존재하는지를 알아낼 수 있다.

ii) 전달은 한 방향으로만 일어난다.



흥분 전도 속도가 2인 신경 A의 지점 d_3 에 자극을 주고, 각 지점에서의 막전위를 전체 시간이 3일 때 측정했다고 해보자. 이때 각 지점의 막전위는 어떻게 나타날까?

흥분의 전달은 오직 이전 뉴런의 축삭 돌기 → 이후 뉴런의 가지 돌기 방향으로만 일어날 수 있다. 따라서 $d_3 \rightarrow d_2$ 로의 흥분 전달은 일어날 수 없으니, 지점 d_2 , d_1 으로는 자극이 도달할 수 없다.

