

흥분의 전도

흥분의 전도와 관련된 문제를 풀기 위해서 다음과 같은 개념을 알아야 한다.

1. 뉴런의 구조
2. 흥분이 전도/전달되는 과정

이는 흥분의 전도를 풀기 위해서는 아주 기본적으로 알고 있어야 하는 개념이다. 이에 대해 제대로 공부가 되어 있지 않다면 기본서를 활용해 공부하도록 하자.

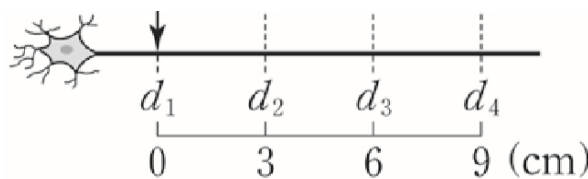
흥분의 전도는 개념으로만 풀리는 파트가 전혀 아니다. 17수능부터 난이도가 점점 올라가기 시작했고, 멘델과 연관이 빠진 이번 교육과정에서 더욱 어렵게 출제될 것으로 예상되는 파트이다. 가계도와 함께 생명과학1의 최고난도 문제를 책임질 것으로 보인다. 18수능, 19수능, 20수능에 모두 출제되었다.

흥분의 전도와 관련된 문제는 3가지의 접근법을 이용해 문제를 풀어 낸다.

- 1) 총 시간 = 흥분이 전도되는 시간 + 막전위 그래프 변화 시간
- 2) 자극을 먼저 전도 받은 지점이 막전위 그래프의 오른쪽에 위치한다.
 - 2-1) 자극을 먼저 받은 시점이 막전위 그래프의 오른쪽에 위치한다.
- 3) 주어진 속도에 따라 대응될 수 있는 막전위 값을 확인하자.

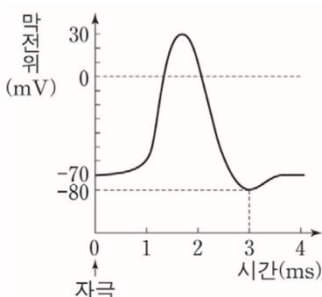
이 3가지 접근법을 활용하여 문제를 풀어 낼 것이다.

Part 1. 총 시간 = 흥분이 전도되는 시간 + 막전위 그래프 변화 시간



이 뉴런의 d_1 에 자극이 주어졌다고 생각해 보자. 각 d_1, d_2, d_3, d_4 의 막전위는 어떤 원리로 형성되는 것일까?

d_1, d_2, d_3, d_4 의 막전위는 d_1 에 자극을 준 후 얼마만큼의 시간이 지났는지, 이 뉴런의 막전위 그래프는 어떻게 형성되어 있는지 알아야만 구할 수 있다.



이 막전위 그래프가 바로 d_1, d_2, d_3, d_4 의 막전위를 알려주는 그래프이다.

d_1 에 자극을 준 후 5ms만큼의 시간이 흘렀다고 가정해보자.

d_1 에 자극을 주었으므로 d_1 의 막전위를 측정할 때는 흥분이 전도되는 시간을 고려하지 않아도 된다. 흥분이 전도되는 시간이 0이기 때문에.

다만 d_2, d_3, d_4 의 막전위와 같은 경우에는 d_1 에서 각 부분까지 흥분이 전도되는 시간을 고려해야만 한다.

여기에서 자극을 준 후 5ms만큼의 시간이 흘렀다고 가정했으니 총 시간은 5ms라고 할 수 있다.

5ms = 흥분이 전도되는 시간 + 막전위 그래프 변화 시간 → 각 d_2, d_3, d_4 가 d_1 과 떨어져 있는 거리가 다르기 때문에 흥분이 전도되는 시간도 다르고, 막전위 그래프 변화 시간도 다를 것이다.

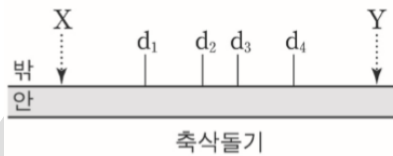
자극을 준 지점과 가장 멀리 떨어져 있는 d_4 가 막전위 그래프 변화 시간이 가장 짧을 것이고, 자극을 준 지점인 d_1 이 막전위 그래프 변화 시간이 가장 길 것이다.

여기에서 Part 2. '자극을 먼저 전도 받은 지점이 막전위 그래프의 오른쪽에 위치한다.'가 나온다.

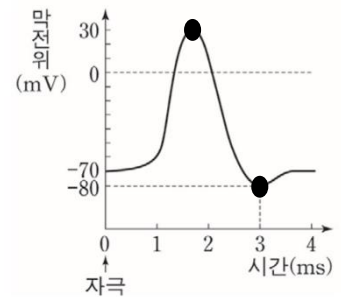
Part 2. 자극을 먼저 전도 받은 지점이 막전위 그래프의 오른쪽에 위치한다.

위에서 서술한 것과 같은 원리로, 총 시간이 일정할 때 자극을 먼저 전도 받은 지점이 막전위 그래프가 변화할 시간이 더 길기 때문에 막전위 그래프에서 더 오른쪽에 위치할 수 있다.

예를 들어,



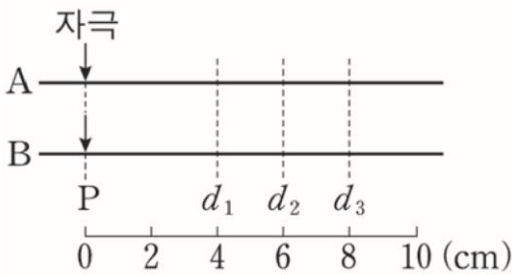
지점	막전위(mV)
d_1	-70
d_2	+30
d_3	-80
d_4	-70



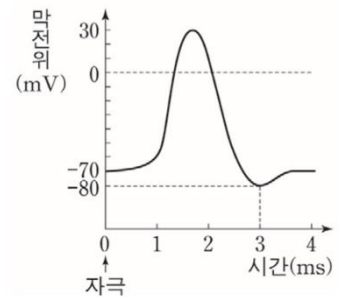
X또는 Y에 자극이 주어졌고, 표는 한 시점에 측정한 각 지점의 막전위 값을 나타낸 것이라고 하자. 이때 X에 자극이 주어졌는지 Y에 자극이 주어졌는지 생각해 보자.

d_3 에 해당하는 -80mV라는 막전위는 d_2 에 해당하는 +30mV라는 막전위보다 막전위 그래프에서 항상 오른쪽에 있는 것을 볼 수 있다. 그렇기 때문에 d_3 에 해당하는 지점이 d_2 에 해당하는 지점보다 먼저 자극을 전도 받았을 것이라고 추론할 수 있다. 자극은 Y에 주어졌을 것이다.

이와 같은 논리를 이용한다면 다음과 같은 문제도 풀어낼 수 있다.



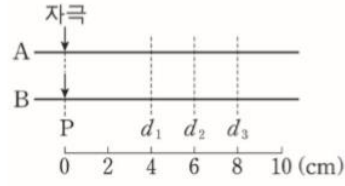
	d_1
신경 A	-50
신경 B	-60



P지점에 자극을 주고, T라는 시간이 지난 뒤 각 신경의 d_1 에서 측정한 막전위 값을 나타낸 것이다. 흥분의 전도 속도는 $A > B$ 라고 할 때 B의 d_1 은 탈분극 중인가 재분극 중인가?에 대해 생각해 보자.

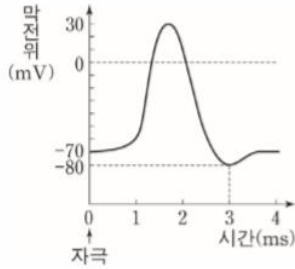
A가 B보다 흥분의 전도 속도가 빠르므로 d_1 에서의 막전위값은 A가 B보다 더 오른쪽에 있을 것이다. 하지만 신경 B가 재분극 중이라면 항상 A보다 더 오른쪽에 있을 수 밖에 없으므로 신경 B는 탈분극 중일 것이다. 다만, A의 d_1 은 탈분극인지 재분극인지 알 수 없다.

Part 1, 2를 활용하여 여러가지 문제를 해결할 수 있다.



신경	5ms일 때 측정된 막전위(mV)		
	d_1	d_2	d_3
A	-80	?	?
B	-70	-80	?

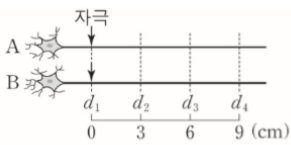
○ A와 B 각각에서 활동 전위가 발생하였을 때, 그림과 같은 막전위 변화가 나타난다.



A와 B의 P지점에 동시에 자극을 주었고, 각 신경의 흥분 전도 속도는 다르다고 한다. 이때 각 신경의 속도를 구해보자.

A의 d_1 에서 막전위가 -80mV로 측정이 되었으므로 d_1 에서 막전위가 변화할 시간은 3ms임을 알 수 있다. 총 시간은 5ms이므로 Part 1에 의해 $5ms = \text{흥분이 전도되는 시간} + 3ms$ 이므로 흥분이 전도되는 시간은 2ms임을 알 수 있다. 2ms동안 4cm를 이동했으므로 A의 속도는 2cm/ms이다.

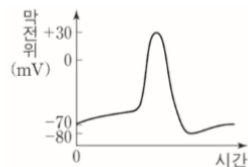
B도 마찬가지로 구해보고, d_1 의 -70mV에 해당하는 막전위는 어느 시점에 해당하는 것인지 생각해보자.



신경	t_1 일 때 측정된 막전위(mV)			
	I	II	III	IV
A	-55	-80	+30	-65
B	-20	-80	-10	㉠

○ A와 B에서 흥분의 전도 속도는 각각 2cm/ms, 3cm/ms이다.

○ A와 B의 $d_1 \sim d_4$ 에서 활동 전위가 발생하였을 때, 각 지점에서의 막전위 변화는 그림과 같다.



두 신경의 막전위 값 차이가 없는 II가 자극을 준 지점이라는 것을 파악할 수 있다.(총시간 = 0 + 막전위)

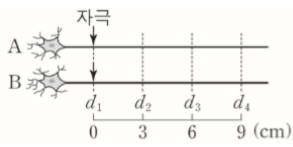
흥분의 전도 속도는 $B > A$ 이므로 B의 III에서 -10mV라는 값은 재분극 중임을 알 수 있다.

마찬가지로 A의 I에서 -55mV라는 값은 탈분극 중임을 알 수 있다.

그렇기 때문에 II -> III -> I 순으로 자극과 가까움.

여기서 자극을 준 지점은 각 신경의 흥분 전도 속도와 무관함을 알아야 한다. Part 1에 의해 (총 시간 = 흥분 전도 시간 + 막전위 변화 시간)인데 자극을 준 지점은 흥분 전도 시간이 0 이므로 모든 시간이 온전히 막전위 변화 시간에 쓰인다는 것이다.

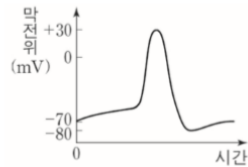
또 한가지 중요하게 생각해 볼 것이 있다.



신경	t_1 일 때 측정된 막전위(mV)			
	I	II	III	IV
A	-55	-80	+30	-65
B	-20	-80	-10	㉠

○ A와 B에서 흥분의 전도 속도는 각각 2cm/ms, 3cm/ms이다.

○ A와 B의 $d_1 \sim d_4$ 에서 활동 전위가 발생하였을 때, 각 지점에서의 막전위 변화는 그림과 같다.



방금 보았던 막전위 문제이다. 여기서 신경 A의 흥분 전도 속도는 2cm/ms이고, 신경 B의 흥분 전도 속도는 3cm/ms이다. 이 전도 속도의 차이를 이용해 막전위 표를 읽는 방법에 대해 서술하겠다.

단순하게 말해서 A와 B에 자극이 주어지면, A에서는 3초후 자극이 d_3 까지 도달하지만 B에서는 3초후 자극이 d_4 까지 도달한다. 그렇기 때문에, A의 d_3 와 B의 d_4 에서는 자극이 주어진 위치가 동일한 경우에 항상 막전위가 똑같을 수 밖에 없는 것이다.

마찬가지로 A의 자극이 주어진 지점과 2cm떨어진 지점과 B의 자극이 주어진 지점과 3cm떨어진 지점은 막전위가 동일할 것이다.

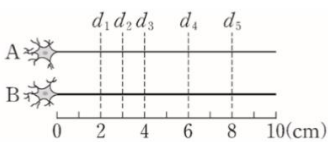
위의 문제에 적용을 해보면, 각 신경의 전도 속도를 통해 A의 d_3 와 B의 d_4 의 막전위가 같아야 함을 인식한 뒤, B의 I과 II, III이 A의 어떤 막전위와 일치하는지 찾아본다. 아무것도 일치하는게 없음을 보면 B의 IV가 d_4 임을 알 수 있는 것이다.

여기까지 Part 1, 2를 이용해 문제를 어떻게 바라보아야 하고, 신경의 전도 문제를 마주쳤을 때 어떤 행동을 할지 생각해 보았다. 다음은 난이도 있는 문제에서 활용될 수 있는 방법인 Part 3이다.

Part 3. 주어진 속도에 따라 대응될 수 있는 막전위 값을 확인하자.

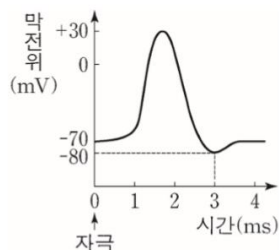
주어진 속도에 따라 대응될 수 있는 막전위 값을 확인하자. - Part 3이다. 이를 이해하는 것은 어렵지 않다.

○ 자극을 준 지점은 $d_1 \sim d_5$ 중 하나이고, A와 B의 흥분 전도 속도는 각각 2cm/ms, 3cm/ms이다.



신경	3ms일 때 측정된 막전위(mV)				
	I	II	III	IV	V
A	+10	?	-80	?	+10
B	-40	+30	㉠	+10	?

○ A와 B 각각에서 활동 전위가 발생하였을 때, 각 지점에서의 막전위 변화는 그림과 같다.



자극을 준 지점이 어디인지 모르기 때문에 단순히 자극을 준 지점과 떨어져 있는 거리를 생각해 보자

1. 자극을 준 지점
2. 자극을 준 지점과 1cm 떨어진 지점
3. 자극을 준 지점과 2cm 떨어진 지점
4. 자극을 준 지점과 3cm 떨어진 지점
5. 자극을 준 지점과 4cm 떨어진 지점
6. 자극을 준 지점과 5cm 떨어진 지점
7. 자극을 준 지점과 6cm 떨어진 지점 (d_1 에 자극을 준다면 d_5 가 6cm 떨어져 있을 수 있다)

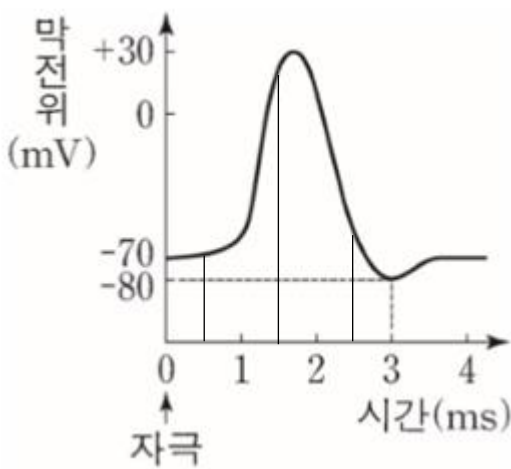
이 거리와 주어진 속도를 생각하여, 대응될 수 있는 막전위 값을 찾는 것이다.

예를 들면 신경 A에서 자극을 준 지점과 1cm만큼 떨어져 있는 지점은 그 지점까지 0.5ms가 소모되고 남은 2.5ms 만큼 막전위 변화를 할 수 있는 것이다.

이를 이용해 각 지점에서 총 시간이 3ms 일 때 막전위 변화를 할 수 있는 시간을 나타낸 표이다.

신경	자극을 준 지점과 떨어져 있는 거리						
	0cm	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm	6cm
A(2cm/ms)	3ms	2.5ms	2ms	1.5ms	1ms	0.5ms	0ms
B(3cm/ms)	3ms	$(2+2/3)$ ms	$(2+1/3)$ ms	2ms	$(1+2/3)$ ms	$(1+1/3)$ ms	1ms

이를 주어진 그래프에 적용해 보자



이를 활용하면, 적어도 0.5, 1, 2.5, 3(ms)라는 시간이 막전위 변화에 사용된다면 절대로 막전위가 양수가 나올 수 없다.

그렇기 때문에 +10mV라는 막전위가 나오기 위해서는 자극을 준 지점과 2cm 또는 3cm만큼 떨어져 있어야만 한다!

하지만 자극을 준 지점과 3cm만큼 떨어져 있는 부분이 두 부분 이상 있을 수 없기 때문에 +10mV라는 막전위는 자극을 준 지점과 2cm만큼 떨어져 있는 부분에서 측정할 막전위라는 것을 알 수 있다.

결론만 간단하게 말하면, 주어진 총 시간과 막전위 그래프, 그리고 신경의 전도 속도를 안다면 표가 주어지지 않아도 각 부분의 막전위를 어느정도 추정할 수 있다는 것이다. 어려운 문제에서 빈번하게 사용되는 접근법이므로 꼭 알아두도록 하자.

마지막으로 정리하면

1) 총 시간 = 흥분이 전도되는 시간 + 막전위 그래프 변화 시간

-> 흥분이 전도되는 시간이 0초인 자극을 받은 지점은 전도 속도와 상관없이 막전위 값이 같을 수 있다.

2) 자극을 먼저 전도 받은 지점이 막전위 그래프의 오른쪽에 위치한다. (지점이 다를 때)

2-1) 자극을 먼저 받은 시점이 막전위 그래프의 오른쪽에 위치한다. (시간이 다를 때)

-> 선 그어서 탈분극/재분극 판단하고 어느 지점이 자극을 준 지점과 가까운지 판별하자.

3) 주어진 속도에 따라 대응될 수 있는 막전위 값을 확인하자.

-> 속도, 막전위 그래프, 총 시간이 주어진다면 각 지점의 막전위를 어느정도 추정할 수 있다.