
임계치 이상의 전류자극에 대한 생체의 반응 연구

장원석* · 최규식**

A Biomedical Response Study for the Transthreshold Current Stimulation

Won-Seok Chang* · Gyu-Shik Che**

이 논문은 2010학년도 건양대학교 학술연구비 지원에 의하여 이루어진 것임

요약

임계치 이하의 자극이 주어지면 흥분막은 어떤 특이한 반응을 나타내지 않으나 어느 정도 이상이 되면 아주 다른 양상을 띄게 된다. 흥분막에는 이러한 특성이 있다는 것이 진작부터 알려져 있었고, 일부 연구자들이 이러한 현상을 전기적인 회로를 이용하여 정량적으로 해석하려 노력하였으나 그것은 임계치 이하의 경우에 대한 것에 불과하다. 특히 임계치 이상의 자극에 대한 반응을 정량적으로 연구한 경우는 극히 드물다. 그런데 전기회로와 생체는 비슷한 점도 있지만 다른 면도 많아서 그대로 이를 적용하기에는 무리가 있다. 이러한 이유로 인하여 본 논문에서는 생체막이 임계치 이상의 자극을 받았을 때에 어떠한 현상을 나타내는가를 전기적인 관점에서 정량적으로 연구하였다

ABSTRACT

When the inferiorthreshold potential is applied on the membrane, the resting status membrane does not display any specific reaction, in the meanwhile if it receives somewhat higher voltages then it shows entirely different configuration. The fact that there is this kind of characteristics on the exciting membrane has been known for a long time, and some researchers have tried to analyze this situation using the electrical circuits but only limited to inferiorthreshold potential case. The quantitative studies of especially for transthreshold stimulus is extremely rare up to now. The direct application of electrical circuit to biostatus is somewhat unreasonal because there may be much differences between them. We studied the electrical reaction quantitatively of biomembrane when it receives the transthreshold stimulus in point of electricity in this paper.

키워드

생체전기 임계치 이상의 자극 흥분막 활동전위

keyword

bioelectricity transthreshold stimulus exciting membrane action potential

* 건양대학교 컴퓨터학과 교수 (교신저자, wschang@konyang.ac.kr)

** 건양대학교 의공학과 교수

접수일자 : 2010. 06. 11

심사완료일자 : 2010. 09. 17

I. 서 론

인체가 정상적인 기능을 유지하기 위해서는 인체 내의 모든 기관들이 상호보완적인 의사소통을 할 수 있는 신호가 필요한데, 이는 각 세포 단위에서 발생하는 활동전위에 의하여 이루어지고 있다. 이러한 활동전위는 세포막을 통한 이온들의 움직임에 의해서 발생, 전달되고 있으며, 궁극적으로는 전기적인 신호의 개념으로 설명될 수 있다. 즉, 생체에서 발생하는 각종 감각을 비롯한 정보의 전달이 전기적인 현상으로 이루어진다는 것이 그간의 수많은 연구를 통하여 밝혀지고 있는 것이다.[1,2,3,4]

모든 뉴런의 표면(세포막)에서 안쪽에는 양이온에 비하여 음이온이 다수로 존재하고, 바깥쪽에는 음이온에 비하여 양이온이 다수로 존재하기 때문에 막 사이에 전위차(전압)가 발생한다. 외부로 나타나는 알짜 전하는 양이온과 음이온의 복잡한 상호작용의 결과이다. 세포의 내부는 보통 세포 외부보다 음성적으로서 이러한 전압차를 뉴런의 안정막전압이라 한다. 뉴런이 자극을 받으면 그 자극 부위에서 안정막전압이 순간적으로 크게 변한다. 활동전압이라 불리는 이러한 전압변화는 축삭을 따라 전파되며, 활동전압의 전파는 인체 내에서 신호를 전달하는 주된 방법이다. 그 자극은 열, 차가움, 빛, 소리, 냄새와 같은 다양한 물리적, 화학적 자극으로 야기된다. 자극이 전기적이라면 막 사이의 약 20mV 정도의 변화만으로도 활동전압이 시작된다.

그러나 외부 자극의 크기에 얼마냐에 따라서 흥분막의 반응이 아주 다르게 된다. 어떤 임계치 이하의 자극이 주어지면 흥분막은 어떤 특이한 반응을 나타내지 않으나 어느 정도 이상이 되면 아주 다른 양상을 띄게 된다. 흥분막에는 이러한 특성이 있다는 것이 진작부터 알려져 있었으며, 참고문헌[1]에서 이러한 현상을 정량적으로 해석하려 노력하였으나 그것은 임계치 이하의 경우에 대한 것으로서 전기회로를 이용하여 일부를 해석한 것에 불과하다. 특히 임계치 이상의 자극에 대한 반응을 정량적으로 연구한 경우는 극히 드물다. 그런데 전기회로와 생체는 비슷한 점도 있지만 다른 면도 많아서 그대로 이를 적용하기에는 무리가 있다.

따라서 이러한 이유로 인하여 본 논문에서는 생체막이 임계치 이상의 자극을 받았을 때 어떠한 현상을 나타내는가를 정량적으로 연구하고자 한다.

2항에서는 생체와 전기가 어떠한 관계를 가지고 있는가를 검토한 후 인체의 흥분막이 외부자극에 대하여 어떠한 반응을 일으키는가를 연구한다. 3항에서는 임계치 이상의 자극에 대한 생체막의 전위를 연구 및 계산한다. 4항에서는 인체의 데이터를 이용하여 외부에서 전기자극을 주었을 경우의 생체 신경계의 임계치 이상 반응에 대한 연구를 한다.

II. 흥분막의 전위

인체에서 신경계는 거의 모든 기능에서 전기적인 신호전달계통의 매체 역할을 한다. 중앙 컴퓨터인 뇌는 체내 및 체외의 신호를 받아 적절한 반응을 수행하며, 모든 정보는 여러 신경을 따라 전기적 신호로 전달된다. 이러한 효율적인 통신 시스템은 대단히 빠른 속도로 한 번에 수백만 개의 정보를 처리할 수도 있다. 생체의 근육이나 신경과 같이 전기적 활동성을 가진 조직의 세포막을 흥분막이라 부른다. 생체에서의 전기현상은 기본적으로 ‘움직임’과 관련되고, 이것은, 극히 예외적인 일부 식물을 제외하면, 동물에서만 볼 수 있는 현상이다. 그 중에서도 가장 대표적인 것은 근육으로서 그 수축 메커니즘이 전기현상과 밀접한 관련이 있다. 생체는 신경계와 호르몬계의 두 가지 제어시스템으로 조절되는 것으로 알려져 있다. 신경 및 근육에서 이루어지는 운동 명령의 전달 및 신속한 조절을 하는 가장 중추적인 역할을 하는 뇌의 활동은 바로 신경계에서의 정보의 전달과 처리 그 자체이다. 그리고 이 근육이나 신경의 활동은 각각의 조직에 존재하는 ‘막(membrane)’의 전기적 활동에 그 근원을 두고 있다.[1]

2.1 평형전위

안정상태에서는 근육세포나 신경세포 내부의 전위가 외부에 대해서 -90 ~ -70mV의 음의 값을 갖는데 이것이 정지전위(resting potential) 혹은 평형전위이다. 그러나 자극에 의한 흥분(excitation) 시에는 이 레벨로부터 양의 방향으로 약 100mV 정도의 순간적인 전위상승이 일

어나는데, 이 상태를 활동전위(action potential)라 부른다. 정지전위와 활동전위 모두가 세포의 가장 외층에 있는 세포막(형질막)에 의해 발생된다. 생체조직은 대부분 전해질 용액으로 구성되어 있으며, 표 1에 개구리와 오징어의 근육과 신경세포막 안팎의 전해질에 의한 이온 구성을 표시하였다.

표 1. 생체막의 전해질 농도(mmol/ℓ)[1]
Table 1. electrolyte density of biomembrane

이온	개구리의 근육		오징어 거대신경의 축삭	
	외부	내부	외부	내부
Na ⁺	120	9.2	460	50
K ⁺	2.5	140	10	400
Cℓ ⁻	120	3~4	540	40~100
기타	-	유산에니온 150	-	이세치온산기 270

세포막이 근사적으로 전기적 중성이고 극성을 가지지 않는다고 가정하면, 각 이온들의 내외농도 차이에 의한 전위차 즉, 평형전위 E(세포막 바깥을 기준으로 한 막 내부의 전위)는 다음과 같은 Nernst의 식으로 표시할 수 있다.[2]

$$E = \frac{RT}{ZF} \ln \frac{n_0}{n_i} \quad (2.1)$$

여기서, R은 기체상수(8.314J/mol · K), T는 절대온도, Z는 이온가(양이온은 +, 음이온은 -), F는 Faraday 상수(9.648×10⁴K/mol), 그리고 ni와 no는 각 이온의 막 내부와 막 외부에서의 활동도(저농도에서의 활동도는 농도와 거의 같음)이다. 이 변수들을 이용하여 신경 혹은 골격근의 흥분막을 전기적 등가회로로 그리면 그림1과 같이 된다. 여기서, RNa, RK, RCℓ은 각각 Na⁺, K⁺, Cℓ⁻ 이온이 통과하는 채널의 저항이고 그 역수들인 gNa, gK, gCℓ은 이온이 잘 통과하는 정도를 나타내는 컨덕턴스[S]이다.

Cm은 막을 구성하는 분자층에 의한 용량(capacitance)을 나타낸다. ENa, EK, ECℓ은 위 각 이온의 평형전위 또는 전지이고, E는 막 전체의 전위 혹은

막전위(membrane potential)이다. 그런데 gNa, gK는 정지시 gK ≫ gNa, gCℓ 이고, 흥분시 gNa ≫ gK, gCℓ 인 흥분막 특유의 시간적 변화를 가진다. 단, gCℓ은 정지시나 흥분시에 관계없이 모두 무시할 수 있을 정도로 매우 작은 값을 가진다.

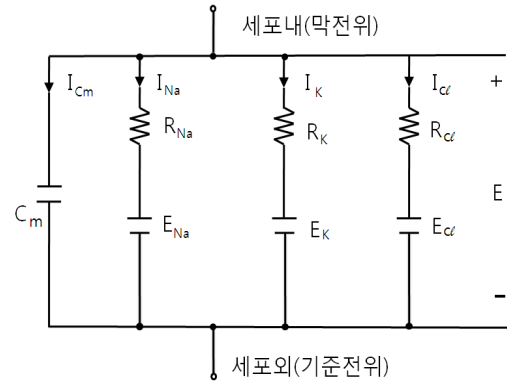


그림 1. 흥분성 생체막의 전기적 등가회로
Fig. 1 electrical equivalent circuit of exciting membrane

한편, Na⁺, K⁺, Cℓ⁻ 이온 전체가 나타내는 막전위 E에 관한 또 다른 정량적 표현으로서는 다음과 같은 Goldman-Hodgkin-Katz 식[2]이 있다.

$$E = \frac{RT}{F} \ln \frac{P_K[K^+]_0 + P_{Na}[Na^+]_0 + P_{Cl}[Cl^-]_i}{P_K[K^+]_i + P_{Na}[Na^+]_i + P_{Cl}[Cl^-]_0} \quad (2.2)$$

여기서 R, T, F는 Nernst 식에서와 같이 각각 기체상수, 절대온도, Faraday 상수이다. P는 투과계수(0<P<1)로서 이온의 막에 대한 투과성(permeability)을 나타내며 막 컨덕턴스 g와 밀접하게 관련된 양이다.

2.2 활동전위

막전위는 등가회로 내의 3개의 평형전위 ENa, EK, ECℓ과 이것이 각각 막전위에 얼마나 영향을 미치는가(컨덕턴스 gNa, gK, gCℓ)에 의해 결정된다. 평형상태에서 막의 내부가 외부에 대해 음성을 띠는 것은 전기의 극성이 막 외부는 +로, 막 내부는 -로 나누어져 있기 때문이며, 이러한 이유로 정지상태를 분극(polarized) 상태라고도 한다. 따라서 막전위(막 내부의 전위)의 상승 및 오버슈트

기간에는 이 분극상태에서 벗어나게 되므로 탈분극(de-polarization) 혹은 흥분(excitation)이나 발화(fire)한다고 한다. 그림 1의 등가회로에서 키르히호프의 전류 법칙을 적용하면

$$I_{C_m} + I_{Na} + I_K + I_{Cl} = 0 \quad (2.3)$$

이 된다. 여기서, 막전위가 안정된 상태 즉, 막전위의 변화가 없을 때는 커패시턴스에 전류가 흐르지 않으므로 $I_{C_m}=0$ 이 되어 식(2.3)은 다음과 같이 간략하게 만들 수 있다.

$$I_{Na} + I_K + I_{Cl} = 0 \quad (2.4)$$

이 식을 정리하면, 막전위 E 는 각각의 전지와 컨덕턴스의 분할비에 의해 다음과 같은 Millman의 정리에 의한 값이 된다.

$$E = \frac{g_{Na}E_{Na} + g_K E_K + g_{Cl}E_{Cl}}{g_{Na} + g_K + g_{Cl}} \quad (2.5)$$

정지시에는 g_K 가 매우 크므로 나머지 항들은 무시되고 E 는 E_K 에 가까운 음의 값을 가지게 된다. 이와 반대로 흥분시에는 커패시턴스에 흐르는 전류를 무시하면 E 는 E_{Na} 에 가까운 양의 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이 현상으로부터 정지시에는 g_K 가 매우 크므로 E_K 의 영향이 절대적이어서

$$E \simeq E_K < 0 \quad (2.6)$$

가 되고, 흥분시에는 g_{Na} 가 크므로 E_{Na} 의 영향이 절대적이어서

$$E \simeq E_{Na} > 0 \quad (2.7)$$

이 된다. 어떤 이유에 의해서든 일단 막전위가 임계치(excitation threshold) 이상이 되면 막은 흥분하여 전위가 양의 값으로 상승하는 오버슈트(overshoot)를 보이게 된다. 막전위가 오버슈트하는 것은 g_{Na} 가 커져서 전위가 E_{Na} 에 가까운 양의 값으로 이동하기 때문이다. g_{Na} 가 크다는 것은 Na^+ 채널(channel)이 열려서 막의 외부에 고농

도로 존재하는 Na^+ 이온이 막 내부로 흘러들어오는 것을 의미한다. 이로 인하여 탈분극 상태로 오버슈트 상태가 되면 이 때부터 그동안 열렸던 Na^+ 채널은 다시 닫히게 되고, 이어서 g_K 가 커져서 막 내부에 고농도로 존재하는 K^+ 이온이 Na^+ 채널과 반대로 막의 외부로 흘러나가게 되는데 이러한 현상을 K^+ 채널이 열린다고 한다. K^+ 이온이 막 외부로 이동하게 되면 오버슈트되었던 막내부의 전위는 하강하게 되는데, 이것은 다시 원래의 분극상태로 복귀하는 것을 의미하므로 재분극(re-polarization)이라고 한다. 그런데 한 번 흥분한 신경막이나 근육막은 일정기간 동안은 잘 흥분하지 않는 불응기(refractory period)를 가진다. 처음에는 어떠한 자극에도 반응하지 않는 절대적(absolute) 불응기의 상태에 있다가 이후에 흥분은 하지만 흥분을 시키기 위한 임계치가 올라가 있는 상대적(relative) 불응기로 이전한 후, 다시 원래의 임계치로 회복된다.

III. 생체전위(막전위)의 정량분석

3.1 과도방정식

회로는 단순히 $R_m=R$ 과 $C_m=C$ 으로 구성되는 1차회로로 귀착시킨다. 따라서 여기에 I_m 이라는 전류자극을 외부에서 가하면 이 회로의 미분방정식은

$$C \frac{dV_m}{dt} + \frac{V_m - E}{R} = I_m \quad (3.1)$$

와 같이 표현되고 이를 정리하면

$$\frac{dV_m}{dt} + \frac{1}{RC} V_m = \frac{E + I_m R}{RC} \quad (3.2)$$

가 성립한다. 이 미분방정식을 푸는 방법은 강제응답(정상해=특수해)과 과도응답(과도해=보조해)로 구분하여 따로 해를 구한 후 합하여 일반해를 만들고, 그 다음에 경계조건에 의해 완전해를 구하는 것이 일반적인 방법이다. 이 미분방정식의 해법을 이용하여 상기 식의 미분방정식을 풀면

$$V_m(t) = (E + I_m R) + ke^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.3)$$

이 되며, 초기조건 $V_m(0)=E$ 를 대입하여 계산하면 $k=-I_m R$

이므로

$$V_m(t) = E + I_m R (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (3.4)$$

이 된다.

3.2 임계치 이상의 전류자극

생체자극을 인가한 직후의 막전위가 임계치를 넘지 않을 때까지의 막전위 V_m 의 과정은 식(3.1)과 같은 $R-C$ 회로 응답을 나타낸다. 그러나 막전위가 일단 임계치를 넘게 되면 지금까지 살펴본 $R-C$ 회로의 현상과는 다른 특성을 나타낸다. 따라서, 막전위가 임계치 이상의 상승으로 인하여 변경된 컨덕턴스 값을 대입하여 등가회로를 다시 생각해야만 제대로 된 결과를 얻을 수 있다. 막이 완전히 흥분상태에 도달했을 때의 등가회로는 그림 2(a)와 같다. 흥분상태에서의 테브낭 등가전압은 $E = E_{Na}$ 이고 등가저항 R_m 은 다음과 같다.

$$R_m = \frac{1}{g_{Na} + g_K + g_{Cl}} \approx \frac{1}{g_{Na}} = R_{Na} \quad (3.5)$$

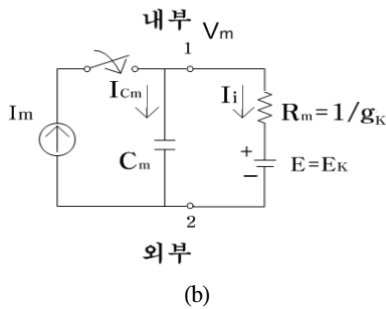
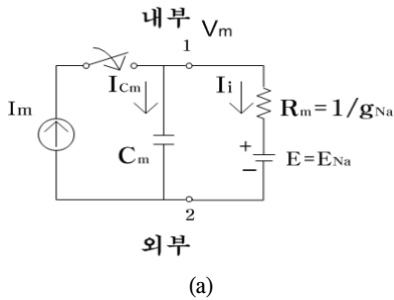


그림 2. 임계치 이상의 자극에 대한 등가회로
 (a) Na^+ 채널 개방 상태 (b) K^+ 채널 개방 상태
 Fig. 2 equivalent circuit for transthreshold stimulus
 (a) Na^+ channel open status (b) K^+ channel open status

이 흥분상태가 오랫동안 지속되어 회로가 정상상태에 도달한다면 앞서의 해석과 마찬가지로 C_m 은 개방상태가 되고, 막전위는

$$V_m = I_m R_m + E \quad (3.6)$$

에 도달하게 되어 테브낭 등가전압인 $56mV$ 보다 높아지게 될 것이다. 그러나 실제로는 이러한 일은 일어나지 않고, 막전위는 약 $30mV$ 까지 상승했다가 다시 하강한다. 이것은 앞에서 알아본 바와 같이 막전위가 어느 정도 상승하면 K^+ 채널이 열려서 테브낭의 등가전압이 E_K 인 $-70mV$ 로 복귀하기 때문이다. 즉, 일단 $t=t_1$ 에서 자극이 임계치를 넘게 되면 그림 2(a)과 같은 회로에 의한 과도 현상을 나타낸다. 이 자극이 활성화되어 Na^+ 채널이 열린 후 $t=t_2$ 인 시간에 K^+ 채널이 열려 그림 2(b)와 같은 재분극이 시작된다. 그리고 $t=t_3$ 인 순간이 되면 Na^+ 채널이 완전히 닫히고 K^+ 채널만이 열려서 재분극을 가속화시킨다. 이를 단계별로 살펴보면 다음과 같다.

(1) $0 \leq t < t_1$ 인 경우

K^+ 가 지배적이 되어 시정수를

$$\tau_1 = R_K C \quad (3.7)$$

로 정의하면 일반해는 식(3.4)에서와 같이

$$V_m(t) = E_K + I_m R_K (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (3.8)$$

으로 표현된다.

(2) $t_1 \leq t < t_2$ 인 경우

이 때는 흥분상태가 되어 Na^+ 가 지배적이 되므로 전위가 E_{Na} 로 되어 시정수를

$$\tau_2 = R_{Na} C \quad (3.9)$$

로 정의하면 일반해는

$$V_m(t) = E_{Na} + I_m R_{Na} + k \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (3.10)$$

의 형태가 된다. $t=t_1$ 인 시간에 막전위가 임계전압 V_c 에 이르는 것을 경계조건으로 하여 k 의 값을 구하면

$$k = (V_c - E_{Na} - I_m R_{Na}) e^{-\frac{t_1}{\tau_2}}$$

이므로

$$V_m(t) = E_{Na} + I_m R_{Na} + (V_c - E_{Na} - I_m R_{Na}) e^{-\frac{t-t_1}{\tau_2}} \quad (3.11)$$

의 형태로 표현된다. 여기서, t_1 은 식(3.8)에 의해

$$t_1 = -R_K C \cdot \ln\left(1 - \frac{V_c - E_K}{I_m R_K}\right) \quad (3.12)$$

이다.

(3) $t_2 \leq t < t_3$ 인 경우

이 때는 Na^+ 채널이 열려 있지만 전류자극과 반대방향으로 K^+ 가 열려서 전류자극을 없애는 방향으로 동작한다.

$$C \frac{dV_m}{dt} + \frac{V_m - E_K}{R_K} = 0$$

즉,

$$\frac{dV_m}{dt} + \frac{1}{R_K C} V_m = \frac{E_K}{R_K C} \quad (3.13)$$

이 되어 시정수를

$$\tau_3 = R_K C \quad (3.14)$$

로 정의하면 그 일반해는

$$V_m(t) = E_{Na} + I_m R_{Na} + (V_c - E_{Na} - I_m R_{Na}) e^{-\frac{t-t_1}{\tau_2}} + E_K + k e^{-\frac{t-t_2}{\tau_3}} \quad (3.15)$$

이다. 경계조건 $V_m(t_2) = V_p$ 을 이용하여 k 값을 구하여 정리하면 다음식과 같다.

$$V_m(t) = E_{Na} + I_m R_{Na} + (V_c - E_{Na} - I_m R_{Na}) e^{-\frac{t-t_1}{\tau_2}} + E_K - \{E_{Na} + I_m R_{Na} + (V_c - E_{Na} - I_m R_{Na}) e^{-\frac{t_2-t_1}{\tau_2}} - V_p + E_K\} e^{-\frac{t-t_2}{\tau_3}} \quad (3.16)$$

(4) $t \geq t_3$ 인 경우

회로방정식은

$$V_m(t) = E_K + k e^{-\frac{t-t_1}{\tau_3}} \quad (3.17)$$

으로 표현된다. K^+ 가 지배적이므로 상기 방정식(3.16), (3.17)로부터 $t=t_3$ 에서의 경계조건을 따져서 상수 k 를 구한다.

$$V_m(t_3) = E_{Na} + I_m R_{Na} + (V_c - E_{Na} - I_m R_{Na}) e^{-\frac{t_3-t_1}{\tau_2}} + E_K - \{E_{Na} + I_m R_{Na} + (V_c - E_{Na} - I_m R_{Na}) e^{-\frac{t_2-t_1}{\tau_2}} - V_p + E_K\} e^{-\frac{t_3-t_2}{\tau_3}} = E_K + k e^{-\frac{t_3-t_1}{\tau_3}} \quad (3.18)$$

이상의 내용을 그림으로 표현하면 그림 3과 같다. 정지상태와 비교해 달라진 것은 흥분에 의해서 g_{Na} 가 커진 후 이어서 g_K 가 더 커졌다는 것이므로 이로 인해 막전위는 정지전위보다 E_k 에 더 가까운 낮은 값으로 하강하여 과분극이 된다. 이후 K^+ 채널은 닫히게 되어 g_k 는 다시 정지상태의 값으로 돌아가므로, 시간이 어느 정도 흐른 후에는 막전위는 정지전위의 값을 가지게 된다. 활동 후에 복구단계에서는 정지조건을 복구한다. 그러나 전위는 그 시간 동안 정지값보다 더 과분극되거나 더 탈분극으로 되돌아간다. 이 그림에서 예시한 이러한 후전위(afterpotentials)는 단 하나만 나타나거나, 또는 다른 것이 보인다면 관찰될 수도, 그렇지 않을 수도 있다.(탈분극 또는 과분극 조건이 발생하면 기준은 탈분극 또는 과분극 후전위로 된다.) 여기서는 시간의 함수로 막투과전위를 나타내었다. 균일섬유를 전과하는 활동전위는 섬유 길이 방향의 함수로서 활동전위를 가진다. 그러한 공간

적인 활동전위는 그것이 거울영상(mirror image)을 가지며, 상이한 수평선 치수를 가지는 것을 제외하고는 순간 전위와 유사한 형태를 가진다.

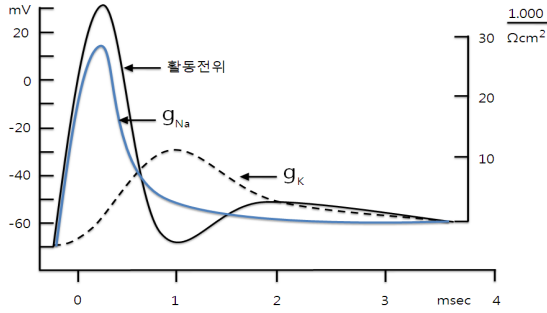


그림 3. 임계치 이상의 전류자극 응답
Fig. 3 stimulus response of transthreshold stimulus

IV. 실제 예

어떤 생체 세포막의 임계전압이 -54mV 이고 이 세포막의 정지시 막전압은 -70mV , 막저항은 $R_{Na} = 5.4 \times 10^6 \Omega$, $R_K = 0.6 \times 10^6 \Omega$ 이며 막용량은 $C_m = 2\text{nF}$ 이다. 이 생체에 120 nA 의 전류를 인가하여 세포가 흥분하도록 한다. 흥분시 막전압은 $+56\text{mV}$ 가 되며, $R_{Na} = 0.01 \times 10^6 \Omega$, $R_K = 0.03 \times 10^6 \Omega$ 으로 변한다. 여기서 t_1 은 자극이 임계전압을 초과하여 흥분상태로 접어들고 Na^+ 채널이 열리는 시각, t_2 는 K^+ 채널이 열리는 시각, t_3 는 Na^+ 채널이 닫히는 시각을 나타내며, τ_1, τ_2, τ_3 은 각각의 시정수를 나타낸다.

(1) $0 \leq t < t_1$ 인 경우

K^+ 가 지배적이 되어 시정수를

$$\begin{aligned} \tau_1 &= R_K C = (0.6 \times 10^6)(2 \times 10^{-9}) \\ &= 1.2 \times 10^{-3} \text{sec} = 1.2 \text{msec} \end{aligned} \quad (4.1)$$

로 하면 전위는

$$\begin{aligned} V_m(t) &= E_K + I_m R_K \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) \\ &= -70 + 72 \left(1 - e^{-\frac{t}{1.2 \times 10^{-3}}}\right) \end{aligned} \quad (4.2)$$

으로 표현된다. 여기서 임계전압 $V_c(t_1) = -54\text{mV}$ 에

이르는 시간을 구하면

$$\begin{aligned} t_1 &= -\frac{1.2}{1000} \ln\left(1 - \frac{16}{72}\right) \\ &= 3.01577 \times 10^{-4} \text{sec} = 0.301577 \text{msec} \end{aligned} \quad (4.3)$$

(2) $t_1 \leq t < t_2$ 인 경우

이 때는 흥분상태가 되어 Na^+ 가 지배적이 되므로 전위가 E_{Na} 로 되어 시정수를

$$\begin{aligned} \tau_2 &= R_{Na} C = (0.01 \times 10^6)(2 \times 10^{-9}) \\ &= 0.02 \times 10^{-3} \text{sec} = 0.02 \text{msec} \end{aligned} \quad (4.4)$$

로 정의하면 일반해는

$$V_m(t) = E_{Na} + I_m R_{Na} + k \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4.5)$$

의 형태가 된다. $t=t_1$ 인 시간에 막전위가 임계전압 V_c 에 이르는 것을 경계조건으로 하여 k 의 값을 구하여 이 방정식을 정리하면

$$\begin{aligned} V_m(t) &= E_{Na} + I_m R_{Na} + (V_c - E_{Na} - I_m R_{Na}) e^{-\frac{t-t_1}{\tau_2}} \\ &= 57.2 - 111.2 e^{-\frac{t-t_1}{0.02 \times 10^{-3}}} \end{aligned} \quad (4.6)$$

의 형태로 표현된다.

(3) $t_2 \leq t < t_3$ 인 경우

이 때는 Na^+ 채널이 열려 있지만 전류자극과 반대방향으로 K^+ 가 열려서 전류자극을 없애는 방향으로 동작한다. 시정수를

$$\begin{aligned} \tau_3 &= R_K C = (0.03 \times 10^6)(2 \times 10^{-9}) \\ &= 0.06 \times 10^{-3} \text{sec} = 0.06 \text{msec} \end{aligned} \quad (4.7)$$

로 하며, 그런데 t_3 까지는 Na^+ 채널도 개방되어 있으므로 그 일반해는

$$\begin{aligned} V_m(t) &= E_{Na} + I_m R_{Na} + (V_c - E_{Na} - I_m R_{Na}) e^{-\frac{t-t_1}{\tau_2}} \\ &\quad + E_K + k e^{-\frac{t-t_2}{\tau_3}} \end{aligned} \quad (4.8)$$

이다. 경계조건 $V_m(t_2) = V_p$ 을 이용하여 k 값을 구하여 정리하면 다음식과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_m(t) &= E_{Na} + I_m R_{Na} + \\
 &(V_c - E_{Na} - I_m R_{Na})e^{-\frac{t-t_1}{\tau_2}} + E_K - \{E_{Na} + I_m R_{Na} + \\
 &(V_c - E_{Na} - I_m R_{Na})e^{-\frac{t_2-t_1}{\tau_2}} - V_p + E_K\}e^{-\frac{t-t_2}{\tau_3}} \\
 &= -12.8 - 111.2e^{-\frac{t-t_1}{0.02 \times 10^{-3}}} \\
 &+ 70.05345e^{-\frac{t-t_2}{0.06 \times 10^{-3}}}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

단, 방정식(4.6)에 의하여 $t_2=0.32970\text{msec}$ 이다.

(4) $t \geq t_3$ 인 경우

K^+ 가 지배적이므로 이 경우에는

$$V_m(t) = E_K + ke^{-\frac{t-t_1}{\tau_3}} \tag{4.10}$$

로 표현된다. 상기 방정식(4.9), (4.10)으로부터 $t=t_3$ 에서의 경계조건을 따져서 상수 k 를 구한다.

$$\begin{aligned}
 V_m(t_3) &= E_{Na} + I_m R_{Na} + \\
 &(V_c - E_{Na} - I_m R_{Na})e^{-\frac{t_3-t_1}{\tau_2}} + E_K - \{E_{Na} + I_m R_{Na} + \\
 &(V_c - E_{Na} - I_m R_{Na})e^{-\frac{t_2-t_1}{\tau_2}} \\
 &- V_p + E_K\}e^{-\frac{t_3-t_2}{\tau_3}} = E_K + ke^{-\frac{t_3-t_1}{\tau_3}}
 \end{aligned}$$

따라서

$$V_m(t) = -70 + 136.427 \cdot e^{-\frac{t-t_2}{0.06 \times 10^{-3}}} \tag{4.11}$$

이 된다. 단, 여기서 $t_3=0.35\text{msec}$ 이다. 이상의 분석 내용을 정량적으로 계산하면 그림 4와 같다. 처음 자극이 주어진 후 일정기간 동안은 반응이 서서히 증가하다가 임계치를 지나게 되면 갑자기 급격하게 증가되는 것을 볼 수 있다. 피크치에 이른 후에는 비교적 완만하게 하강하며, 재분극 과정으로 복귀하는 것을 알 수 있다.

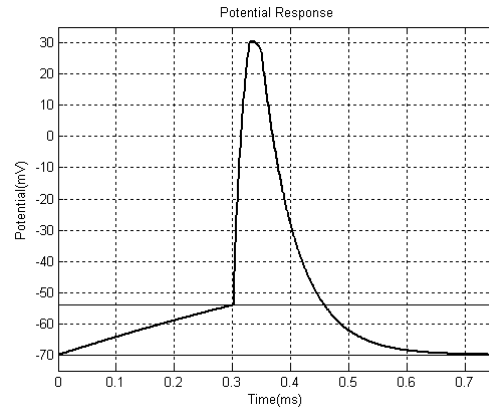


그림 4. 임계치 이상의 자극에 대한 정량적인 응답 곡선

Fig. 4 quantitative response curve for the transthreshold stimulus

V. 결론

인체에서 외부 자극에 대한 인체의 반응은 전기적 인 신호에 의해서 전달되고 처리된다는 것이 계속적으로 밝혀지고 있다. 자극을 감지하고 이를 판단하여 적절히 대응하는 것은 대뇌를 중심으로 한 중추신경계에서 이루어진다고 했을 때 이 모든 정보전달이 전기적 인 신호에 의한 것이다. 그런데 외부의 자극이 인체의 정보로서 필요한 어느 한계치(임계치라 함)보다 크면 세포막을 자극시켜서 Na^+ 채널이 열려 흥분전압을 발생시킨다. 이 흥분전압은 탈분극 상태에서 오버슈트하게 되어 피크치에 도달한다. 얼마 후에 세포막 내에 있던 K^+ 이온이 열린 채널을 통하여 세포막의 밖으로 유출되어 상승하던 흥분 곡선이 하강하게 된다. 이 하강으로 인하여 세포는 재분극상태로 돌입하게 된다. 그런데 이러한 현상이 어떠한 형태로서 어떠한 역할을 하게 되는가가 아직 정확하게 밝혀지지 않고 다만 정성적인 방법에 의하여 그 특성이 일부 밝혀지고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 이러한 관계를 정량적으로 분석하기 위해서 알고리즘을 세우고 이미 제시된 데이터를 이용하여 이를 구현하고자 하였다. 본 논문에서는 외부 자극이 신경계가 발화를 필요로 하는 임계치 이상인

경우를 분석하였다. 물론 임계치 이상인 경우는 그 행동이 더욱 더 복잡하다. 그 결과는 그림 4와 같으며, 이 결과는 전기적인 과도현상과 유사한 형태를 취하게 된다. 이 그림에 의하면 처음 자극이 주어진 후 일정기간 동안은 반응이 서서히 증가하다가 임계치를 지나게 되면 갑자기 급격하게 증가된다. 피크치에 이른 후에는 비교적 완만하게 하강하며, 재분극 과정으로 복귀하는 것을 알 수 있다.



최규식(Gyu-Shik Che)

1973년 서울대학교 공과대학
전기공학과(공학사)
1983년 뉴욕공과대학 전기공학과
(공학석사)

1993년 명지대학교 전기공학과 (공학박사)
1978년~1993년 한국전력기술 중앙연구소 책임연구원
1993년~현재 건양대학교 의공학과 교수
※관심분야: 생체계측, 의학물리

참고문헌

- [1] 호시야마 노조무, 엄광문 · 김영철 편역, “의용계측의 기초”, 양서각, 2004.8.
- [2] Stuart Ira Fox, “Human Physiology”, 7th ed., Academic Internet Publisher, 2009.12.
- [3] Robert Plonsey, Roger C. Barr, “Bioelectricity - A Quantitative Approach”, 3rd ed., Springer, pp97-154, 2007.
- [4] Paul Davidovits, “Physics in Biology and Medicine”, 3rd ed., Academic Press, pp180-199, 2008.
- [5] Martin Zinke-Allmang, “Physics for the Life Science”, Nelson Education, pp443-480, 2007.
- [6] Irving P. Herman, “Physics of the Human Body”, Springer, pp713-766, 2007.

저자소개



장원석(Won-Seok Chang)

인하대학교 전자공학과(학사)
인하대학교 전자공학과(석사)
인하대학교 정보공학(박사)
국방과학연구소 전자통신실근무

(미)UCLA 방문교수
현재 건양대학교 컴퓨터학과 교수
※관심분야: 생체계측 및 전송시스템