

뉴런의 분포정수 회로화에 의한 자극전위의 전도현상 연구

A Study on the Propagation Phenomenon of Neural Stimulated Potential using Distributed Electrical Circuit

최규식*

Gyu-Shik Che*

요 약

뉴런의 신경임펄스는 뉴런이나 축삭 자신의 자극에 의하여 유도되며, 이 자극전압이 임계치 이하이면 뉴런의 전도거리와 전도시간에 따라 지수함수적으로 감쇠된다. 이러한 현상은 전기회로에서의 전도현상과 매우 유사한 형태이므로 전기적인 등가회로를 이용하여 해석할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 뉴런의 전기적인 각종 파라미터를 구한 후 전기회로의 분포정수회로 이론을 적용하여 자극전도 현상을 해석하였다.

Abstract

The nerve impulse is induced by the stimulation of neuron or axon, and this stimulated voltage decays along the propagation distance and time if it is subthreshold potential. This behavior can be estimated using the electrical equivalent circuit because it is very similar to propagation phenomenon of electrical circuit to which Ohm's law is applied. Therefore, I calculated various biometric parameters of body, and then analyzed the propagation behavior of stimulated potential voltage using the distributed parameters of electrical circuit in this paper.

Keywords : subthreshold potential, neuron, axon, action potential, distributed electrical equivalent circuit

I. 서 론

인체 내에서는 모든 기관들이 상호보완적인 의사소통을 할 수 있도록 하는 신호가 각 세포 단위에서 발생되어 인체가 정상적인 기능을 유지하도록 한다. 이러한 활동전위는 세포막을 통한 이온들의 움직임에 의해서 발생, 전달되고 있으며, 궁극적으로는 전기적인 신호의 개념으로 설명할 수 있다. 즉, 생체에서 발생하는 각종 감각을 비롯한 정보의 전달이 전기적인 현상으로 이루어진다는 것이 그간의 수많은 연

구를 통하여 밝혀지고 있는 것이다[1-5].

이처럼 본질적으로 인체의 모든 기능과 활동은 어떤 형태로든 전기와 관련되어 있다. 예를 들어 근력은 극성이 다른 전하의 인력에 의해 발생하며, 뇌의 활동도 기본적으로는 전기적인 것으로서 뇌로 들어가고 나오는 모든 신경신호는 전류의 흐름과 관련이 있다. 인체의 기능을 수행하는 데에는 이와 같은 많은 전기적 신호가 발생되는데, 이러한 신호들은 특정 세포의 전기화학적 활동의 결과로 나타나는 것이다. 그런데 신경이 외부의 자극을 받으면 어떠한 현상을

* 건양대학교 의공학과

· 제1저자 (First Author) : 최규식

· 투고일자 : 2010년 12월 1일

· 심사(수정)일자 : 2010년 12월 2일 (수정일자 : 2011년 4월 25일)

· 게재일자 : 2011년 4월 30일

일으킬 것인가가 Hodgkin과 Huxley[6]에 의해서 정량적으로 해석되었다. 그 이후 이를 바탕으로 하여 여러 가지 전기자극 현상에 관한 연구가 진행되었으나 [3] 이들은 모두가 신경이 최초로 외부 자극을 받은 후 시간 경과에 따라 어떠한 현상을 일으킬 것인가에 관한 것으로 국한되었다. ○디러한 자극들이 신경망을 타고 전파되는 현상에 대한 연구는 찾아보기 어렵다.

따라서 본 논문에서는 뉴런이 외부의 자극에 반응하여 신경망을 따라 중추신경 및 뇌로 전달되는 현상을 전기적인 회로의 개념에 의해서 해석하고자 한다. 2항에서는 세포의 흥분막에서 전위가 어떻게 형성되는가를, 그리고 이 흥분에 의한 자극의 반응이 어떠한 형태로 전도되는가를 해석한다. 3항에서는 전기회로, 그 중에서도 분포정수회로를 이용하여 축삭의 각종 파라미터를 구하는 방법을 제시하고, 자극전위가 축삭을 따라 전도되는 형태를 분석하였다. 4항에서는 뉴런과 신경의 각종 파라미터들을 구하는 방법을 제시하고 5항에서는 실제로 주어진 모델에 의하여 신경의 파라미터를 구한 후 주어진 자극이 뉴런의 축삭을 따라 전도되는 거동을 계산하였다.

II. 흥분막의 전위

1. 흥분막 내외의 전위 형성

생체의 근육이나 신경과 같이 전기적 활동성을 가진 조직의 세포막을 흥분막(興奮膜 ; excitable membrane)이라 부른다. 미국의 전기전자공업규격인 IEEE Std 539-1990에서는 흥분막을 “적당한 자극에 의하여 흥분될 때 이온의 투과율에 갑작스럽게 큰 변화가 생기는 전기화학적 특성을 가지는 신경이나 근육 세포의 얇은 막(膜)(The membrane of nerve or muscle cells having an electrochemical property that results in sudden, major changes in ionic permeability when excited by an appropriate stimulus.)”이라 정의하고 있다. 생체는 신경계와 호르몬계의 두 가지 제어 시스템으로 조절되는 것으로 알려져 있다. 신경 및 근육에서 이루어지는 운동 명령의 전달 및 신속한 조

절을 하는 가장 중추적인 역할을 하는 뇌의 활동은 바로 신경계에서의 정보의 전달과 처리 그 자체이다. 이 근육이나 신경의 활동은 각각의 조직에 존재하는 ‘막(membrane)’의 전기적 활동에 그 근원을 두고 있다[1]. 모든 뉴런의 표면(세포막)에서 안쪽에는 음이온이 다수로 존재하고, 바깥쪽에는 양이온이 다수로 존재하기 때문에 막 사이에 전위차(전압)가 발생한다. 이 양이온과 음이온의 복잡한 상호작용에 의해서 외부로 순수 전하가 표현되는 것이다. 이 때문에 세포의 내부는 보통 세포 외부보다 음성적으로서 이러한 전압차를 뉴런의 안정막전압이라 한다. 뉴런이 자극을 받으면 그 자극 부위에서 안정막전압이 순간적으로 크게 변한다. 활동전위라 불리는 이러한 전압변화는 축삭을 따라 전파되며, 이 활동전위의 전파는 인체 내에서 신호를 전달하는 주된 방법이다. 그런데 이 자극은 열, 차가움, 빛, 소리, 냄새와 같은 다양한 물리적, 화학적 방법으로 야기된다. 자극이 전기적이라면 막 사이의 약 20mV 정도의 변화만으로도 활동전압이 시작된다. 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.

2. 활동전위의 거동

뉴런은 전기적인 임펄스를 전도하는 특별한 성질을 가지고 있으며, 뉴런의 신경임펄스는 뉴런이나 축삭 자신의 자극에 의해서 유도되는데, 그 자극은 주입된 화학적, 기계적 압력, 또는 인가된 전압일 수 있다. 어떤 자극에 의해서 흥분막 양단의 전압의 크기가 임계치 이상이 되면 축삭막의 나트륨 투과성이 급속히 증가한다. 그 결과 축삭 내부의 전위가 +의 값으로 구동된다. 이 과정에 의해서 전위가 갑자기 상승한 후 곧이어 축삭 내부의 칼륨이온이 축삭 밖으로 유출되어 나트륨이온에 의하여 상승되었던 전위가 급격히 하강하여 최초의 정지전위로 좀더 서서히 복귀한다. 전체적인 펄스는 어느 주어진 지점을 수 msec에 통과한다. 그러나 자극의 세기가 임계치에 못 미치게 되면 상황이 달라지는데, 이러한 전위를 계층전위라 하며, 흥분막을 발화시키지 못하고 축삭을 따

라 진행되면서 감소되고 결국은 소멸된다. 이러한 방법으로 그 동요는 불꽃이 도화선을 따라 전파해가듯 순차적으로 축삭을 따라 전파해 나아가는 것이다.

III. 축삭의 전기적 해석

1. 축삭의 전기전도 모델

뉴런의 축삭에 전압을 가하게 되면 여러 가지 현상이 발생하는데 특히 축삭 안에서, 그리고 축삭 주위로 저항과 관련된 하전이온에 의한 전류가 발생된다. 전압을 가하게 되면 이것이 축삭을 따라 진행하게 되고 옴의 법칙에 의하여 전압은 점차 약해지면서 에너지가 발생된다. 이 과정에서 축삭막에서 나오거나 들어가는 전하의 운동이 발생되며, 캐패시턴스에 의하여 하전 표면 사이에 저장된 전계에너지의 변화가 생기고, 이러한 축삭막을 통한 전하의 투과에도 변화가 생긴다. 참고문헌[7]에서 제시된 그림 3-1과 같은 반경이 a 이고 길이가 δx 인 실린더형 미소 축삭을 고려해보기로 한다. 이것은 축삭을 따라 x 에서 $x + \delta x$ 까지 확장되며 세포막 자체 내의 실린더형 표면을 가진다. x 에서의 전압은 $V(x)$ 로, $x + \delta x$ 에서의 전압은 $V(x + \delta x)$ 로 가정한다. 원형질막, 예를 들면 축삭 내의 매체를 흐르는 이온에 의해 실린더로 들어오는 전류는 $I_i(x)$ 이고 여기를 떠나는 전류는 $I_i(x + \delta x)$ 이다. 이러한 구조에 키르히호프의 전류법칙을 적용하여 실린더로 모여드는 모든 전류를 더한다. 여기에는 앞에서 언급한 바와 같이 실린더 안으로 들어가는 전류 $I_i(x)$ 와 실린더 밖으로 나가는 전류 $-I_i(x + \delta x)$ 가 있다. 그 외에 세포막 양단의 이온 흐름에 의한 전류흐름 I_m 도 있다. 전류가 축삭막을 통해서 유출될 때 그것을 양의 값으로 약속하며, 축삭으로 들어갈 때는 $-I_m$ 으로 한다. 축삭막의 바깥에는 $+q$ 전하가 있으며 내부의 벽에는 $-q$ 전하가 있는 이러한 물리적인 모델을 그림 3-2에 보였다.

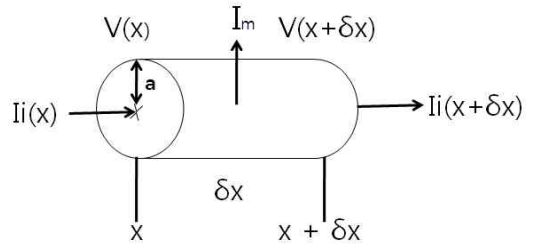


그림 3-1 막전류를 포함한 실린더형 축삭의 전류 Fig 3-1.

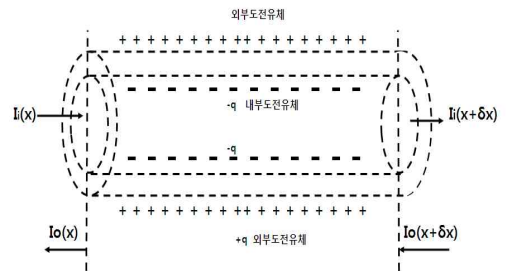


그림 3-2 축삭전류에 대한 물리적인 모델 Fig 3-2.

2. 축삭의 등가회로화

뉴런의 축삭은 수동소자를 가진 전기케이블로 취급할 수 있다. 축삭의 특성을 규정하기 위해 축삭내 유체의 저항 r_i , 축삭외 유체의 저항 r_o , 축삭막의 저항 r_m 을 축삭 단위길이당으로 특징화할 수 있다. 축삭은 또한 단위길이당 캐패시턴스 c_m 으로 특징지을 수도 있다. 이렇게 파라미터들을 특징화하여 축삭을 그림 3-3에서 보인 반복 유닛트를 이용한 전기케이블로 모델화할 수 있다. 지금까지 서술한 것들은 계층 전위가 감소된다는 가정 하에 설명할 수 있으며, 축삭을 따라 전위가 전파되기 위해서는 축삭막 양단을 통과하는 이온전류가 추가로 필요하다. 이 그림에서 r_i 는 축삭 내부의 저항, r_o 는 축삭 외부의 저항, r_m 은 막의 저항, c_m 은 막의 캐패시턴스이다.

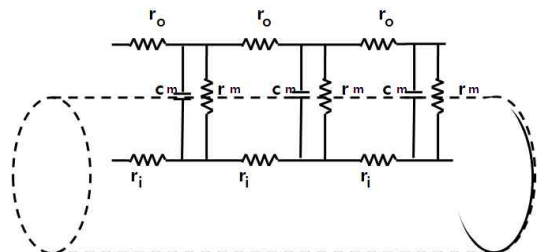


그림 3-3 축삭의 분포회로 모델 Fig 3-3.

3. 분포정수회로 해석

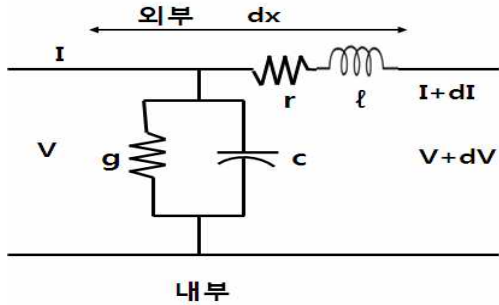


그림 3-4 축삭의 분포정수회로화
Fig 3-4.

신경회로를 등가적인 전기회로로 변환하여 해석하고자 할 때 집중정수회로로 취급하여 계산하면 오차가 매우 커지므로 분포정수회로로 가정하여 분석해야만 한다. 분포정수회로란 회로의 각종 정수(저항, 인덕턴스, 캐패시턴스, 누설콘덕턴스)를 각각 R[Ω/m], L[H/m], C[F/m], G[S/m]로 정의한다. 그리고 미소길이 dx당 각각의 값을 r[Ω], L[H], c[F], g[S]라 하면

$$r=Rdx, L=Ldx, c=Cdx, g=Gdx \quad (3.1)$$

의 관계가 있다. 이 분포정수회로에 정상상태에서 전압 및 전류가 작용하는 것으로 하면 선로에 분포되는 직임피던스 및 병렬 어드미턴스는 아래와 같이 표현된다.

$$Z = (R + j\omega L)[\Omega/m] \quad (3.2)$$

$$Y = (G + j\omega C)[S/m] \quad (3.3)$$

홍분이 발생되는 지점을 x=0으로 하여 여기서부터 x 만큼 떨어진 지점의 전압과 전류를 각각 V(x), I(x)라 가정한다. 발화지점으로부터 x+dx인 거리에 있는 지점의 전압과 전류는 dx 구간에 존재하는 직렬

임피던스 Zdx 및 병렬어드미턴스 Ydx에 의해서 감소하는 것이 분명하므로

$$-dV = IZdx \quad (3.4)$$

$$-dI = VYdx \quad (3.5)$$

의 관계를 가진다. 이 방정식들을 변형한

$$\frac{dV}{dx} = -ZI \quad (3.6)$$

$$\frac{dI}{dx} = -YV \quad (3.7)$$

는 독립변수 x에 관한 연립선형미분방정식이 된다. 이 식들을 다시 x에 관하여 미분하면

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -Z \frac{dI}{dx} = ZYV \quad (3.8)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = -Y \frac{dV}{dx} = ZYI \quad (3.9)$$

와 같은 파동방정식을 얻을 수 있다. 이제 전파정수 r을

$$r = \sqrt{ZY} = \alpha + j\beta \quad (3.10)$$

로 정의하면 식(3.8)의 일반해는 다음과 같다.

$$V(x) = c_1 e^{-rx} + c_2 e^{rx} \quad (3.11)$$

위 식에서 α는 감쇠정수, β는 위상정수라 한다. 전류에 관한 일반해는 식(3.6)으로부터

$$\begin{aligned} I &= -\frac{1}{Z} \frac{dV}{dx} = \frac{1}{\sqrt{Z/Y}} (c_1 e^{-rx} - c_2 e^{rx}) \\ &= \frac{1}{Z_c} (c_1 e^{-rx} - c_2 e^{rx}) \end{aligned} \quad (3.12)$$

와 같은 식을 얻을 수 있다. 여기서,

$$Z_c = \sqrt{Z/Y} \tag{3.13}$$

로 정의되는 관계를 특성임피던스라 한다. 그런데 신경망에서 발화거리에서 멀리 떨어진 곳인 $x \rightarrow \infty$ 의 지점에서는 (3.11), (3.12)의 두 번째항이 무한히 커지게 되는데 이러한 경우는 물리적으로 가능하지 않으므로 $c_2=0$ 가 되어야 한다. 그러므로 상기 두 식은 아래와 같이 단순화된다.(편의상 $c_1=c$ 로 놓는다.)

$$V(x) = ce^{-rx} = ce^{-(\alpha + j\beta)x} \tag{3.14}$$

$$I(x) = \frac{c}{Z_c} e^{-rx} = \frac{c}{Z_c} e^{-(\alpha + j\beta)x} \tag{3.15}$$

상수 c 의 값을 구하기 위해 $x=0$ 일 때 $V(0)=V_a$ 인 경계조건을 사용하면 $c=V_a$ 가 된다. 따라서 윗식은

$$V(x) = V_a e^{-(\alpha + j\beta)x} \tag{3.16}$$

$$I(x) = \frac{V_a}{Z_c} e^{-(\alpha + j\beta)x} \tag{3.17}$$

와 같이 정리된다. 한편 지금까지 검토한 내용들은 발화전의 전압이 0인 경우이다. 그런데 실제 신경의 흥분막은 발화전의 전압이 $V_i(-70mV)$ 정도이므로 경계조건에 의해 (3.16)은 다음과 같은 식으로 수정되어야 한다.

$$V(x) = V_a e^{-(\alpha + j\beta)x} + V_i \tag{3.18}$$

즉, $x=0$ 인 곳에서 발화되는 전압은 V_a 로서 x 의 값이 증가함에 따라 지수함수적으로 감소한다는 것을 의미한다.

IV. 뉴런과 신경의 파라미터 산출

축삭의 전기적인 특성을 해석하기 위해 참고문헌[6]에서 제시한 무수신경 및 유수신경 축삭에 관한 파라미터들을 구하면 이를 분포저항과 분포캐패시턴스를 가진 케이블로 가정하여 회로를 해석할 수 있다. 무수신경의 고유저항을 ρ_i 로, 축삭의 반경을 a 로 하면 축삭 방향의 축삭내부의 단위길이당 저항은 다음과 같다.

$$R_i = \rho_i \frac{1}{\pi a^2} = \frac{\rho_i}{\pi a^2} \tag{4.1}$$

막의 고유저항을 ρ_m , 막의 두께를 b 라 하면 축삭 방향의 축에 수직인 막의 단면적은 $2\pi ab$ 이다(그림 4-1 참조). 따라서 축삭방향을 따른 막의 단위길이당 저항은

$$R_m = \rho_m \frac{1}{2\pi ab} = \frac{\rho_m}{2\pi ab} \tag{4.2}$$

로 표현된다. 실제로 이 저항값은 너무 크므로 축삭 방향의 전압강하에 의한 전류와 비교해볼 때 막을 따라 흐르는 전류는 무시할만 하다.

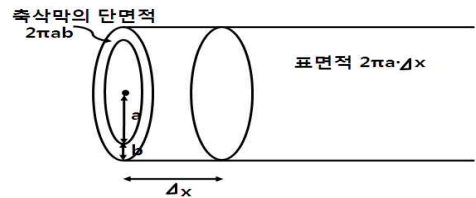


그림 4-1 축삭 모식도
Fig 4-1.

주어진 흥분막의 표면적을 A 라 하면 막을 투과하는 양단의 단위면적당 저항은

$$R = \rho_m \frac{\ell}{A} = \rho_m \frac{b}{1} = \rho_m b \tag{4.3}$$

이므로 막을 투과하는 양단의 단위면적당 콘덕턴스는

$$G_m = \frac{1}{R} = \frac{1}{\rho_m b} \quad (4.4)$$

로서 저항의 역수가 된다. 한편 무수축삭에서 축삭반경 a가 막의 두께 b에 비하여 매우 크므로 실린더형으로 생긴 막은 길이방향으로 펼 수가 있어서 면적이 $A = 2\pi aL$ 이고 간격이 b인 판을 가진 평판캐패시터처럼 모델화할 수 있다. 여기서 L은 축삭의 길이이다. 무수축삭인 경우 단위길이당 캐패시턴스는

$$C_m = \frac{2\pi aL \cdot k\epsilon_o}{b} / L = \frac{2\pi ak\epsilon_o}{b} \quad (4.5)$$

이고 단위면적당 캐패시턴스는 다음과 같다. 단, 축삭의 k 값은 7이라고 한다.

$$C_a = \frac{c_m \times L}{2\pi aL} = \frac{k\epsilon_o}{b} \quad (4.6)$$

이상의 내용을 정리하면 표 4-1과 같다.

표 4-1 무수신경과 유수신경의 대표적인 파라미터들
Table 4-1.

| 구 분 | 기호 | 무수신경 | 유수신경 |
|---------------------------|---------------|------------------------|------------------------|
| 축삭의 내경 | a | 5×10^{-6} | 5×10^{-6} |
| 막/미엘린의 두께(m) | b | 6×10^{-9} | 2×10^{-6} |
| 축삭의 고유저항(Ωm) | ρ_i | 0.5 | 0.5 |
| 막의 유전상수(S/ Ωm) | $k\epsilon_o$ | 6.20×10^{-11} | 6.20×10^{-11} |
| 막/미엘린의 고유저항(Ωm) | ρ_m | 1.6×10^7 | 1.6×10^7 |

V. 실 레

무수 축삭에 $V_a=10mV$ 의 자극이 가해졌다고 가정하면 표 3-1에서 무수신경의 고유저항은 통상 $\rho_i=0.5 \Omega \cdot m$ 이며 축삭의 반경은 $a=5 \times 10^{-6}$ 이므로 축삭 방향의 축삭내부의 단위길이당 저항은 다음과 같다.

$$R_i = \frac{\rho_i}{\pi a^2} = \frac{0.5 ohm \cdot m}{\pi (5 \times 10^{-6} m)^2} = 6.37 \times 10^9 ohm/m = 6.37 \times 10^3 ohm/\mu m$$

표 4-1로부터 막의 고유저항은 $\rho_m=1.6 \times 10^7 \Omega \cdot m$ 이고 막의 두께는 $b=6 \times 10^{-9}m$ 이므로 축삭방향을 따른 막의 단위길이당 저항은

$$R_m = \frac{\rho_m}{2\pi ab} = \frac{1.6 \times 10^7 \Omega \cdot m}{2\pi (5 \times 10^{-6} m)(6 \times 10^{-9} m)} = 8.5 \times 10^{19} \Omega/m = 8.5 \times 10^{13} \Omega/\mu m$$

인데, 앞에서 언급한 바와 같이 이 저항이 너무 크므로 막을 따라 흐르는 전류를 무시하기로 한다. 무수축삭의 단위길이당 캐패시턴스는

$$C_m = \frac{2\pi ak\epsilon_o}{b} = \frac{2 \times 3.14 \times 5 \times 10^{-6} \times 6.20 \times 10^{-11}}{6 \times 10^{-9}} = 3.2 \times 10^{-7} F/m$$

이고 단위면적당 캐패시턴스는 다음과 같다.

$$C_a = \frac{k\epsilon_o}{b} = \frac{6.20 \times 10^{-11} S/\Omega m}{6 \times 10^{-9} m} = 0.01 F/m^2$$

이 값들은 참고문헌[6]에서 계산한 것과 매우 유사하다. 따라서

$$\begin{aligned} Z = R &= R_i + R_o = \\ &2 \times 6.37 \times 10^9 = 1.27 \times 10^{10} \Omega/m, \\ Y = G_m + j\omega C_m &= \\ &1.25 \times 10^{-4} + j \times 300 \times 3.2 \times 10^{-7} \\ &= 1.576 \times 10^{-4} \angle 37.52^\circ U/m, \\ r = \sqrt{ZY} &= \sqrt{1.27 \times 10^{10} \times 1.576 \times 10^{-4} \angle 37.52^\circ} \\ &= 1.415 \times 10^3 \angle 18.76^\circ = (1.340 \times + j0.455) \times 10^3 \end{aligned}$$

의 값이 된다. 그러므로

$$V(x) = -70 + 10 \exp\{-(1.340 + j0.455) \times 10^3 x\}$$

$$= -70 + 10e^{-1.340 \times 10^3 x} \cdot e^{-j0.455 \times 10^3 x} \text{ (mV)}$$

와 같은 최종적인 전위의 전파식을 얻을 수 있다.

VI. 분석 및 결과 검토

상기 시례를 통하여 구한 결과에 의하면 임계치 이하의 자극은 x=0인 지점에서 $V_a+V_i=10-70=-60\text{mV}$ 인 값을 가지나 전파거리 x가 증가함에 따라 지수함수를 따라 점차적으로 감쇠된다는 것을 알 수 있다. 자극이 시작되어 초기치의 37%로 감쇠하는 거리는 0.75mm이고 13.5%로 감쇠되는 거리는 1.5mm이다(그림 6-1 참조). 여기서, $e^{-j0.455 \times 10^3 x}$ 는 전도되는 자극 파형의 위상차이다.

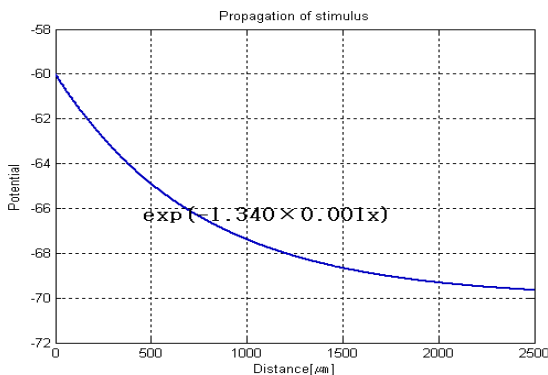


그림 6-1 자극의 전파
Fig 6-1.

VII. 결 론

뉴런이 어떤 자극에 의해서 흥분막 양단의 전압의 크기가 임계치 이상이 되면 축삭막의 나트륨 투과성이 급속히 증가한다. 그 결과 축삭 내부의 전위가 +의 값으로 구동된다. 이 과정에 의해서 전위가 갑자기 상승한 후 곧이어 급격히 하강하여 최초의 정지전위로 좀더 서서히 복귀한다. 전체적인 펄스는 어느 주어진 지점을 수 msec에 통과한다. 그러나 자극의 세기가 임계치에 못미치는 경우, 이러한 전위를 계층 전위라 하며, 흥분막을 발화시키지 못하고 축삭을 따

라 진행되면서 감쇠되고 결국은 소멸된다. 이러한 방법으로 그 동요는 불꽃이 도화선을 따라 전파해가듯 순차적으로 축삭을 따라 전파해 나아가는 것이다. 이러한 뉴런의 자극 전파가 전기적인 현상과 매우 유사하기 때문에 뉴런의 신호전달을 구현할 때는 전기적인 회로를 이용하게 된다. 그런데 신경회로를 등가적인 전기회로로 변환하여 해석하고자 할 때 집중정수회로로 취급하여 계산하면 오차가 매우 커지므로 선로정수가 선로를 따라 균일하게 분포된 것으로 가정할, 이른바 분포정수회로로 가정하여 분석해야만 한다.

본 논문에서는 축삭의 전도 현상을 분석하기 위해서 축삭을 전기전도 모델로 만든 후 여기에 키르히호프의 전류법칙과 전압법칙을 적용한 등가회로를 구성하였다. 축삭의 미세거리 변화에 의한 전위의 거동을 분석하기 위하여 축삭의 각종 파라미터를 구한 후, 축삭을 등가적인 분포정수회로로 구성하여 이에 수반되는 미분방정식을 풀어서 축삭의 전도 거리에 따른 전위의 변화를 구현하였다.

참 고 문 헌

- [1] 호시야마 노조무, 임광문·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] A. L. Hodgkin, A. F. Huxley, "A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve", *University of Cambridge, J. Physiol.*, pp500-544, 1952.
- [7] Irving P. Herman, "Physics of the Human Body", *Springer*, pp713-766, 2007.

최 규 식 (崔圭植)



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