

# 임계치 이하의 자극에 대한 생체의 반응 연구

## A Study on the Bio-response to the Underthreshold Stimulation

최 규 식\*

Gyu-Shik Che\*

### 요 약

인체의 신호정보전달은 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 있다. 그런데 그동안에는 이러한 신경전달관계가 정성적으로 기술되고 분석되었다. 따라서 본 논문에서는 이러한 관계를 정량적으로 분석하기 위해서 알고리즘을 세우고 이미 제시된 데이터를 이용하여 이를 구현하고자 하였다. 단, 이미 언급한 것처럼 본 논문에서는 외부 자극이 신경계가 발화를 필요로 하는 임계치 이상이 아니라 그 이하인 경우를 분석하였다. 이는 전기회로의 과도현상과 매우 유사하며, 이와 유사성에 근거하여 분석하였다. 본 논문에서 제시하여 연구 및 분석한 결과를 나타내어 앞으로의 연구 주제의 기초가 되도록 하였다.

### Abstract

The signal transmission of human body is processed by the action potential from each cell unit. This kind of action potential is taken place and transmitted by the ions through cell membrane, and ultimately explained as an electrical signal concept. The fact that the information is established as an electrical status as well as various senses from the bio-organozm has been addressed through several studies.

By the way, this nervous transmission relation has been described and analyzed qualitatively in the mean time. I established new algorithm to analyze these relations quantitatively and implemented them using existing bio-data in this paper. The study, however, was limited to underthreshold potential to excite the nervous system against the outer stimulation.

This is very much analog to electrical transient of the switching circuit, and therefore, I analyzed it based on this analog. I made it clear that the results derived here is the basis further study topic.

Keywords : threshold exciting membrane action potential Nernst equation biological potential Millman's theorem

### 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 신호

\* 건양대학교 의공학과(Bioengineering Dept. in Konyang University)

· 제1저자 (First Author) : 최규식

· 투고일자 : 2010년 6월 1일

· 심사(수정)일자 : 2010년 6월 3일 (수정일자 : 2010년 6월 25일)

· 게재일자 : 2010년 6월 30일

의 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]

인체 내부에서 발생하는 전기는 신경, 근육, 장기들을 조절하고 그 기능을 수행시키는 역할을 한다. 즉, 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 많은 전기적 신호가 발생되는데, 이러한 신호들은 특정 세포의 전기화학적 활동의 결과로 나타나는 것이다.

그런데 그동안 전기와 인체와는 별 관계가 없는 것으로 생각되어 전기공학분야와 의학분야 상호간에 연계에 대한 연구가 소홀했던 것이 사실이다. 이제 의학을 연구하기 위해서는 전기적인 이론 및 생체의 전기적인 현상을 해석해야 하는 것이 필수적인 코스로 되었다. 우리나라에서 그동안 의학계열, 생명산업계열, 보건산업계열에 관한 수많은 문헌이 발행되고 발표되었으나 전기생리학에 관한 문헌이 전무하다시피 한 것은 정말로 놀라운 사실이 아닐 수 없다. 따라서 이러한 이유로 인하여 본 논문에서는 이 분야를 정량적으로 연구하고자 한다.

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

른 속도로 한 번에 수백만 개의 정보를 처리할 수도 있다.

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.[5]

### 2-1 평형전위

안정상태에서는 근육세포나 신경세포 내부의 전위가 외부에 대해서 -90 ~ -70mV의 음의 값을 갖는데 이것이 정지전위 혹은 평형전위이다. 그러나 자극에 의한 흥분시에는 이 레벨로부터 양의 방향으로 약 100mV 정도의 순간적인 전위상승이 일어나는데, 이 상태가 활동전위이다. 정지전위와 활동전위 모두가 세포의 가장 외층에 있는 세포막(형질막)에 의해 발생된다. 생체조직은 대부분 전해질 용액으로 구성되어 있으며, 표 2-1에 개구리와 오징어의 근육과 신경 세포막 안팎의 전해질에 의한 이온구성을 표시하였다.

표 1 생체막의 전해질 농도(mmol/l)[5]

Table 1. electrolyte density of biological membrane

이온	개구리의 근육		오징어 신경의 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	-	유산에 니온 <sup>-</sup> 150	-	이세치 온산기 <sup>-</sup> 270

여기서 주어진 변수들을 이용하여 신경 혹은 골격근의 흥분막을 전기적 등가회로로 그리면 그림 2-1과 같이 된다.

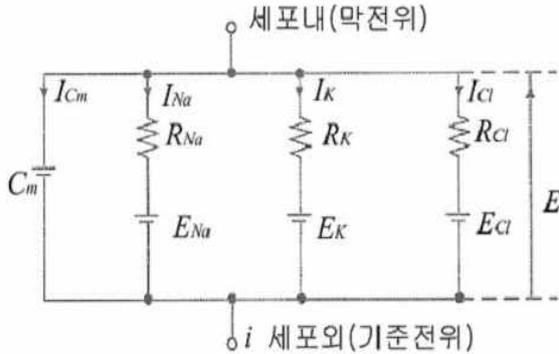


그림 1. 흥분성 생체막의 전기적 등가회로  
Fig 1. electrical equivalent circuit of exciting membrane

그림에서  $R_{Na}$ ,  $R_K$ ,  $R_{Cl}$ 은 각각  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$  이온이 통과하는 채널의 저항이고 그 역수들인  $g_{Na}$ ,  $g_K$ ,  $g_{Cl}$ 은 이온이 잘 통과하는 정도를 나타내는 컨덕턴스[S]이다.  $C_m$ 은 막을 구성하는 분자층에 의한 용량(capacitance)을 나타낸다.  $E_{Na}$ ,  $E_K$ ,  $E_{Cl}$ 은 위 각 이온의 평형전위 또는 전지이고,  $E$ 는 막 전체의 전위 혹은 막전위(membrane potential)이다. 그런데  $g_{Na}$ ,  $g_K$ 는 정지시  $g_K \gg g_{Na}$ ,  $g_{Cl}$ 이고, 흥분시  $g_{Na} \gg g_K$ ,  $g_{Cl}$ 인 흥분막 특유의 시간적 변화를 가진다. 단,  $g_{Cl}$ 은 정지시나 흥분시에 관계없이 모두 무시할 수 있을 정도로 매우 작은 값을 가진다.

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]

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

여기서,  $R$ 은 기체상수(8.314J/mol·K),  $T$ 는 절대온도,  $Z$ 는 이온가(양이온은 +, 음이온은 -),  $F$ 는 Faraday 상수(9.648×104K/mol), 그리고  $n_i$ 와  $n_o$ 는 각 이온의 막 내부와 막 외부에서의 활동도(저농도에서의 활동도는 농도와 거의 같음)이다.

한편,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$  이온 전체가 나타내는 막전

위  $E$ 에 관한 또 다른 정량적 표현으로서는 다음과 같은 Goldman-Hodgkin-Katz 식[2]이 있다.

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

여기서  $R$ ,  $T$ ,  $F$ 는 Nernst 식에서와 같이 각각 기체상수, 절대온도, Faraday상수이다.  $P$ 는 투과계수( $0 < P < 1$ )로서 이온의 막에 대한 투과성(permeability)을 나타내며 막 컨덕턴스  $g$ 와 밀접하게 관련된 양이다. 개구리 세포의 경우  $P_K = 2 \times 10^{-8}$ (m/s),  $P_{Na} = 2 \times 20 \times 10^{-10}$ (m/s),  $P_{Cl} = 4 \times 10^{-8}$ (m/s)이다.  $[ ]$ 은 이온의 농도(정확하게는 활동도)를 나타내고 있다. 첨자  $i$ 는 세포 내부,  $o$ 는 외부를 표시한다.

### 2-2 활동전위

막전위는 등가회로 내의 3개의 평형전위  $E_{Na}$ ,  $E_K$ ,  $E_{Cl}$ 과 이것이 각각 막전위에 얼마나 영향을 미치는가(컨덕턴스  $g_{Na}$ ,  $g_K$ ,  $g_{Cl}$ )에 의해 결정된다. 평형 상태에서 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 오버슈트기간에는 이 분극상태에서 벗어나게 되므로 탈분극(de-polarization) 혹은 흥분(excitation)이나 발화(fire)한다고 한다. 그림 2-1의 등가회로에서 키르히호프의 전류법칙을 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.

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

위 식의 각 전류에 막전위  $E$ 와 각 전지의 전압을

대입하면

$$\frac{(E - E_{Na})}{R_{Na}} + \frac{(E - E_K)}{R_K} + \frac{(E - E_{Cl})}{R_{Cl}} = (E - E_{Na})g_{Na} + (E - E_K)g_K + (E - E_{Cl})g_{Cl} = 0$$

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

$$E = \frac{g_{Na}E_{Na} + g_K E_K + g_{Cl}E_{Cl}}{g_{Na} + g_K + g_{Cl}} \tag{2.5}$$

정지시에는 gK가 매우 크므로 나머지 항들은 무시되고 E는 EK에 가까운 음의 값을 가지게 된다. 이와 반대로 흥분시에는 커패시턴스에 흐르는 전류를 무시하면 E는 ENa에 가까운 양의 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이 현상으로부터 정지시에는 gK가 매우 크므로 EK의 영향이 절대적이어서

$$E \simeq E_K < 0 \tag{2.6}$$

가 되고, 흥분시에는 gNa가 크므로 ENa의 영향이 절대적이어서

$$E \simeq E_{Na} > 0 \tag{2.7}$$

이 된다. 이 활동전위의 시간적 패턴과 각 단계를 그림 2-2에 나타냈다. 어떤 이유에 의해서든 일단 막전위가 임계치(excitation threshold) 이상이 되면 막은 흥분하여 전위가 양의 값으로 상승하는 오버슈트(overshoot)를 보이게 된다. 막전위가 오버슈트하는 것은 그림 2-2에서 볼 수 있는 바와 같이 gNa가 커져서 전위가 ENa에 가까운 양의 값으로 이동하기 때문이다. gNa가 크다는 것은 Na+ 채널(channel)이 열려서 막의 외부에 고농도로 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 gK가 커져

서 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 되는 재분극 상태가 된다. 그런데 한 번 흥분한 신경막이나 근육막은 일정기간 동안은 잘 흥분하지 않는 불응기(refractory period)를 가진다. 이 불응기에는 절대적 불응기와 상대적 불응기가 있다.

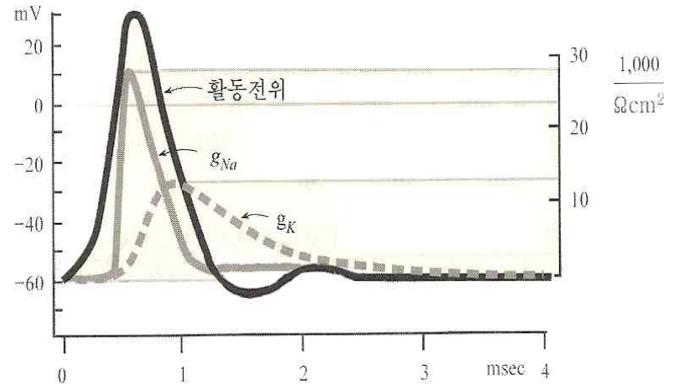


그림 2. 활동전위파형  
Fig 2. waveform of action potential

### III. 생체전위(막전위)의 정량분석

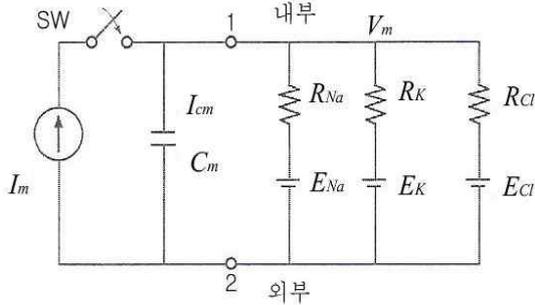
임계치 이하의 탈분극과 과분극의 경우에는 정지시의 막저항 Rm과 막용량 Cm으로 결정되는 시정수

$$\tau = RC \tag{3.1}$$

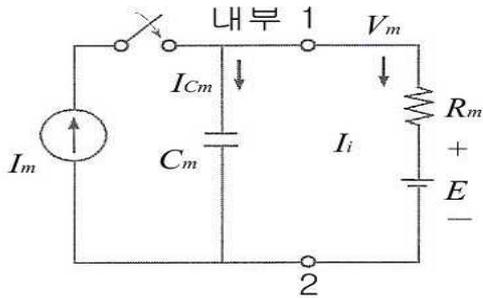
을 갖고 있는 일반적인 1차 R-C회로로서의 시간응답을 나타낸다. 전류자극에 대한 막의 등가회로는 그림 3-1(a)와 같고, 이 회로에서 정지상태를 가정하여 막용량 Cm의 오른쪽을 테브낭 등가회로로 대체하면 그림 3-1(b)와 같다. 테브낭 등가전압은 Cm의 오른쪽에서 단자 1, 2 양단에 걸리는 전압이며, 정지상태를 가정하였으므로 이 전위는 평형전위 E와 같고, 이것은 EK에 가까워서 약 -90mV가 된다. 테브낭 등가 저항 Rm은 전원을 제거한 회로의 양단의 저항으로서, 결국 등가회로의 3개의 저항의 병렬합성과 같다. 따라서

$$R_m = \frac{1}{g_{Na} + g_K + g_{Cl}} \approx \frac{1}{g_K} \quad (3.2)$$

가 된다.



(a) 막의 등가회로



(b)  $C_m$  오른쪽 회로의 테브낭 등가 표현

그림 3. 임계치 이하의 자극에 대한 등가회로  
Fig 3. equivalent circuit for the subthreshold stimulation

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

$$C \frac{dV_m}{dt} + \frac{V_m - E}{R} = I_m \quad (3.3)$$

와 같이 표현되고 이를 정리하면

$$\frac{dV_m}{dt} + \frac{1}{RC} V_m = \frac{E + I_m R}{RC} \quad (3.4)$$

가 성립한다. 이 미분방정식을 푸는 방법은 강제 응답(정상해=특수해)과 과도응답(과도해=보조해)로 구분하여 따로 해를 구한 후 합하여 일반해를 만들고, 그 다음에 경계조건에 의해 완전해를 구하는 것

이 일반적인 방법이다. 이 미분방정식의 해법을 이용하여 상기 식의 미분방정식을 풀면

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

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

$$V_m(t) = E + I_m R (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (3.5)$$

이 된다. 그런데 이는 임계치 이하인 경우이므로 칼륨이 지배인자가 된다.  $t=0$ 이면

$$V_m(0) = E \quad (3.6)$$

로서 이 전압은 흥분 전  $C_m$ 에 이미 충전되어 있던 초기전압이다.  $t=\infty$ 일 때 막전위는 안정된 값을 취하게 되고  $C_m$  양단의 전압변화는 없다. 즉 이 상태에서  $C_m$ 은 개방상태이므로 인가한 전류  $I_m$ 은 모두 저항 쪽을 통해서만 흐른다. 그러므로 식에서와 같이 막전위는

$$V(\infty) = I_m R + E \quad (3.7)$$

가 되어 본래의 막 평형전위  $E$ 보다  $I_m R$ 만큼 상승한 값이 막전위의 최종값이다. 즉 식(3.5)의 우변 첫 항인  $E$ 는 baseline을 의미하고, 두 번째 항인  $(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$ 는  $t=0$ 일 때 0,  $t=\infty$ 일 때 1이다. 결과적으로  $t=0$ 일 때는 baseline 전압인  $E$ 가 되고  $t=\infty$ 일 때는 여기에  $I_m R$ 만큼을 더한  $(E + I_m R)$ 이 된다.

한편,  $t=t_0$ 에서 전류자극을 중단하면 그림 3에서

$$C \frac{dV_m}{dt} + \frac{V_m - E}{R} = 0 \quad (3.8)$$

이므로 이를 정리하면

$$\frac{dV_m}{dt} + \frac{1}{RC} V_m = \frac{E}{RC} \quad (3.9)$$

가 성립하여 마찬가지로

$$V_m(t) = E + ke^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.10)$$

이 구해지고, 경계조건을 이용하여

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

이 구해지고, 경계조건을 이용하여

$$k = I_m R(e^{\frac{t_o}{RC}} - 1) \text{를 구해서 대입하면}$$

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

이 된다. 이상의 내용을 그림으로 표시하면 그림 4와 같다.

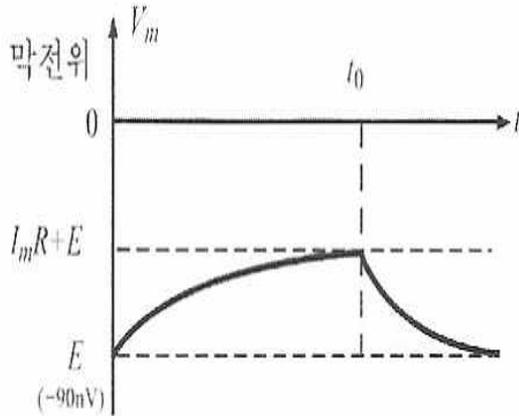


그림 4 임계치 이하의 전류자극 응답  
Fig 4. response of subthreshold current stimulation

#### IV. 실제 예제

본 항에서는 참고문헌[6]에서 제공한 데이터에 의하여 외부 자극에 대한 생체막의 반응전위를 검토 및 계산한다. 생체 세포막의 임계전압이 -60mV이고 이 세포막의 정지시 평형전위는 -90mV, 막저항은  $R_N = 5.4 \times 10^6 \Omega$ ,  $R_K = 0.6 \times 10^6 \Omega$ 이며, 막용량은  $C_m = 2 \text{ nF}$ 이다. 이 세포에 40nA의 전류자극을 가하고 10 msec 후에 자극을 제거하였다. 이 때 반응 전위를 구하기로 한다. 시정수는

$$\tau = RC = (0.64 \times 10^6) \times (2 \times 10^{-9})$$

$$= 1.28 \times 10^{-3} \text{ sec} = 1.28 \text{ msec}$$

이고  $t = \infty$ 일 때의 최종전압은

$$V_m(\infty) = E + I_m R$$

$$= -90 \times 10^{-3} + (40 \times 10^{-9}) \times (0.64 \times 10^9)$$

$$= -64.4 \times 10^{-3} \text{ V} = -64.4 \text{ mV}$$

이므로 임계전압을 초과하지 못하여 발화하지 못한다.  $t_o = 10 \text{ msec}$ 에서

$$V_m(t_o) = E + I_m R(1 - e^{-\frac{t_o}{\tau}})$$

$$= -90 \times 10^{-3} + 25.6 \times 10^{-3} \times 0.999595$$

$$= -64.41 \times 10^{-3} \text{ V} = -64.41 \text{ mV}$$

이고,  $t \geq t_o$ 에서

$$V_m(t) = E + I_m R(e^{\frac{10 \times 10^{-3}}{1.28 \times 10^{-3}} - 1})e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$= -90 \times 10^{-3} + 63.232 \times e^{-\frac{t}{\tau}}$$

로서 이 관계를 그림으로 작도해보면 그 결과는 그림 5과 같다.

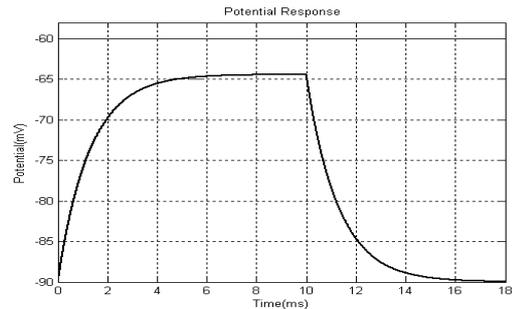


그림 5. 임계치 이하의 자극에 대한 응답  
Fig 5. analytical response of subthreshold current stimulation

#### V. 결론

인체에서 외부 자극에 대한 인체의 반응은 전기적인 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 전

기적인 신호에 의한 것이다. 그런데 외부의 자극이 인체의 정보로서 필요한 어느 한계치(임계치라 함)보다 작으면 이것이 정보로서 주변신경을 통하여 중추신경계로 전달되지 못하게 된다. 그러므로 이것이 어떠한 형태로서 어떠한 역할을 하게 되는지는 아직까지 밝혀지지 않고 다만 정성적인 방법에 의하여 그 성격이 일부 밝혀지고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 이러한 관계를 정량적으로 분석하기 위해서 알고리즘을 세우고 이미 제시된 데이터를 이용하여 이를 구현하고자 하였다. 단, 이미 언급한 것처럼 본 논문에서는 외부 자극이 신경계가 발화를 필요로 하는 임계치 이상이 아니라 그 이하인 경우를 분석하였다. 물론 임계치 이상인 경우는 그 거동이 더욱 더 복잡해질 것이다. 그 결과는 그림 4-1과 같으며, 이 결과는 전기적인 과도현상과 유사한 형태를 취하게 된다.

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

참 고 문 헌

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