

매트랩을 이용한 신경활동 시뮬레이션

김영호 김재훈 이성용

본 논문에서는 매트랩(MatLab)을 사용하여 뉴런(Neuron) 시뮬레이터(Simulator)를 제작 하고, 외부 자극을 변화시키면서 신경 활동을 살펴보았다. 외부 자극이 어떤 문턱값 보다 크게 되면 휴지 상태(Resting State)에서 버스팅 상태(Bursting State)로 전이가 일어나고, 자극이 더 증가하게 되면 스파이킹 상태(Spiking State)로 전이가 일어나게 된다. 이러한 시뮬레이션을 통해서 다양한 신경활동을 이해할 수 있었다.

I

우리의 몸은 신경계를 통해 자극을 받고, 뇌에서 종합 판단해서 반응하게 된다. 이러한 신경계의 기본 단위인 신경세포를 뉴런(Neuron)이라고 한다. 우리의 신경계는 약 10^{11} 개 뉴런으로 구성되어 있고, 각 뉴런은 $10^3 \sim 10^4$ 개의 시냅스(Synapse)로 다른 뉴런들과 연결된 복잡한 구조로 되어 있다. 이러한 뉴런은 외부자극을 받아 활동전위(Action Potential)라는 전기적 신호를 생성하여 전달한다. 외부자극에 대한 활동 전위의 생성 및 전달에 대한 것은 많은 관심을 갖고 연구되어져 왔다 [1].

본 논문에서는 매트랩(MatLab)을 사용하여 뉴런 시뮬레이터(Neuron Simulator)를 제작하고, 외부자극의 세기를 바꾸어 가면서 활동전위의 생성을 살펴보았다. 매트랩은 많은 수학 및 공학 함수들을 내장하고 있는 프로그램으로 사용자의 아이디어를 손쉽게 컴퓨터 프로그램화하고 그 결과를 시각화 하는데도 매우 유용한 소프트웨어(Soft ware) 이다 [2].

대표적인 뉴런모형중 하나인 힌드마쉬-로즈(Hindmarsh-Rose) 뉴런 모형 [3]의 지배방정식을 매트랩에서 지원하는 ODE45함수를 사용하여 적분 후 뉴런의 활동을 시뮬레이터 안의 출력화면을 통하여 보기 쉽게 출력할 수 있도록 제작하였다. 외부자극을 증가시키면 휴지 상태(Resting State)에서 버스팅 상태(Bursting State)로 전이가 일어나고, 자극이 더 증가하게 되면 스파이킹 상태(Spiking State)로 변화함을 볼 수 있었다 [4]. 이러한 시뮬레이터를 사용하여 외부자극에 대한 뉴런의 다양한 신경활동을 이해할 수 있었다.

II. 본 론

1. 뉴런 신경활동 소개

우리의 신경계는 약 10^{11} 개의 뉴런으로 구성되어 있고, 각 뉴런은 $10^3 \sim 10^4$ 개의 시냅스 연결을 가지고 있는 복잡한 구조이다. 이러한 뉴런은 3가지로 나눌 수 있다. 감각 뉴런(Sensory Neuron)은 외부로부터 자극을 받아들이며, 개재 뉴런(InterNeuron)은 뉴런들 간에 연결을 시켜주며, 운동 뉴런(Motor Neuron)은 근육 세포와 연결되어 있어 동작을 제어한다. 신경신호의 전달은

활동전위를 통해서 이루어진다. 수용체 전위는 전압이 작고, 점차적으로 축적되는 전위이다. 반면에, 활동전위는 전압이 크고, 시간간격이 짧으며, 자극이 어떤 문턱값보다 클 때만 생긴다(All or None). 시냅스 전위는 전압이 작고, 점차적으로 축적되는 전위이며 시간 간격이 길다. 이중 우리가 관심 있는 부분은 활동전위이다. 이러한 뉴런의 세포막에는 이온채널이 있다. 이온 채널(ion channel)의 특징은 전도율이 크며 특정 이온만 선택적으로 통과시킨다. 이온채널은 문이 있는 채널과 없는 채널로 나뉘며 문이 없는 채널은 휴지 상태에 보통 열려 있어 휴지 전위를 형성한다. 반면에, 문이 있는 채널은 다음 3가지로 나뉜다. 전압으로 열리는 채널은 활동 전위를 생성하며 화학물질로 열리는 채널은 시냅스 전위를 생성한다. 역학적으로 열리는 채널은 수용체 전위를 생성한다. 역시 우리가 관심있게 보는 채널은 전압으로 열려 활동 전위를 생성하는 채널이다. 휴지 상태에는 문이 있는 이온 채널들은 닫혀있고, 문이 없는 모든 이온채널을 통과 하는 이온전류가 0이 된다. 이때 막전위를 휴지 막전위(Membrane Potential)라고 부른다. 주어진 자극의 크기가 어떤 문턱 값 이상이 되면, 이온채널들의 문을 통해서 전류가 흘러서 뉴런이 발화하게 된다. 이때 생성된 막전위를 활동전위라고 부른다.

2. 매트랩 소개

매트랩은 수치 해석, 행렬 연산, 신호처리 및 간편한 그래픽 기능 등을 통합하여 고성능의 수치 계산 및 결과의 가시화(Visualization) 기능을 제공하는 프로그램이다. 매트랩(MATrix LABoratory)은 그 이름이 말하듯이 행렬 또는 벡터를 기본 자료로 사용하여 기능을 수행하는 계산 환경을 제공한다. 매트랩에서 제공하는 다양한 수치계산 루틴을 사용하면 통상적인 프로그래밍을 하지 않고도 쉽게 수치 계산을 수행할 수 있다 [2].

매트랩의 가장 큰 특징은 M-file을 사용함으로써 특정한 문제를 해결하는데 필요한 응용 프로그램들을 손쉽게 작성할수 있다는 점이다. M-file이란 매크로 파일로서 해석기(interpreter)방식으로 수행되며 사용자가 직접 작성할 수 있는 프로그램이다. 기본적인 내부 명령들 뿐만 아니라 다른 M-file들도 불러서 사용할 수 있으며, 특정한

문제를 풀기 위하여 다른 프로그래밍 언어를 사용하지 않고도 사용자가 직접 M-file을 작성하여 사용할 수 있다. 이러한 매트랩의 장점으로 인해 과학, 수학 및 공학 등의 분야에서 매트랩이 널리 사용되고 있다.

3. 뉴런 시뮬레이터의 제작 및 실행결과

버스팅을 보이는 간단한 모형인 힌드마쉬-로즈 뉴런모형의 시뮬레이터를 제작하고자 한다. 힌드마쉬-로즈 뉴런의 지배방정식은

(1)

이다. 여기서 τ 는 막전위, τ 는 회복변수, τ 는 느린적응변수, I_{dc} 는 외부직류자극을 나타낸다. 환경맞춤변수는 각각

-1.6으로 설정하였다 [3].

우리는 매트랩을 써서 외부자극 I_{dc} 를 변화시키면서 뉴런활동전위를 출력하는 시뮬레이터를 제작하였다.

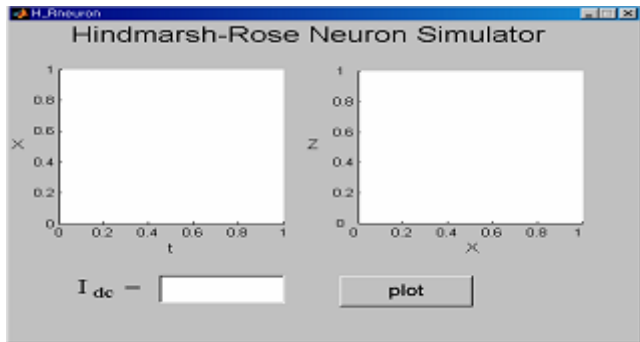


그림1. 매트랩으로 작성한 뉴런시뮬레이터.

그림1의 시뮬레이터 창에서 값을 입력 한 후 'Plot'버튼을 누르면, 시뮬레이터는 ODE45루틴을 써서 위 식(1)을 적분하고, 계산이 끝난 후 결과에 따라 왼쪽 출력창에는 X의 시계열을, 오른쪽 출력창에는 X-Z평면에서의 위상그림을 보여준다. 이 두 그래프를 통해서 뉴런의 신경활동을 볼 수 있다.

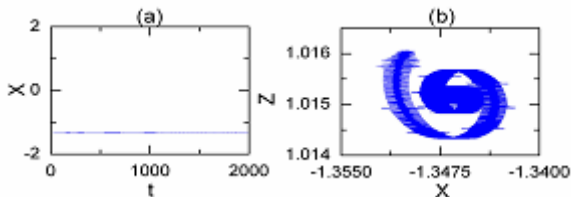


그림2. =1.2의 휴지기에서의 (a) X의 시계열과 (b) X-Z의 위상그림.

그림2(a)와 2(b)는 =1.2일 때 휴지상태에서의 X의 시계열과 X-Z 평면에서의 위상그림을 보여주고 있다. 그림2(a)로부터 휴지상태에서의 휴지 막전압은 -1.34인 것을 알 수 있고, 그림2(b)에서는 휴지상태로 끌려가는 궤도를 보여주고 있다.

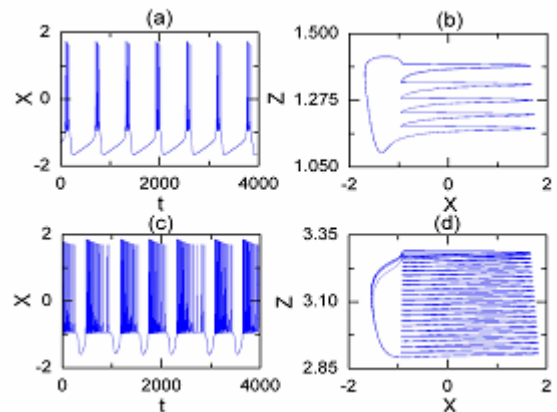


그림3. =1.3의 규칙적인 버스팅에서의 (a) X의 시계열과 (b) X-Z의 위상그림. =3.2의 불규칙적인 버스팅에서의 (c) X의 시계열과 (d) X-Z의 위상그림.

외부자극의 세기가 증가하면서, 문턱값 1.25를 지나면, 휴지 상태에서부터 스파이크가 반복적으로 일어나는 버스팅 상태로의 전이가 일어난다. 이 때, 각 버스트 안의 스파이크 개수와 버스트사이의 시간간격이 일정한 규칙적인 버스팅 상태가 나타나는데, 그림3(a)와 3(b)는 =1.3일 때 규칙적인 버스팅 상태의 X의 시계열과 X-Z 평면에서의 위상그림을 보여주고 있다.

외부자극의 세기가 더 증가하면서, 문턱값 3.11을 지나면, 각 버스트 안의 스파이크 개수와 버스트사이의 시간간격이 일정하지 않은 불규칙적인 버스팅 상태로의 전이가 일어난다. 예로서, 그림3(c)와 3(d)는 =3.2일 때 불규칙적인 버스팅 상태의 X의 시계열과 X-Z 평면에서의 위상그림을 보여 주고 있다.

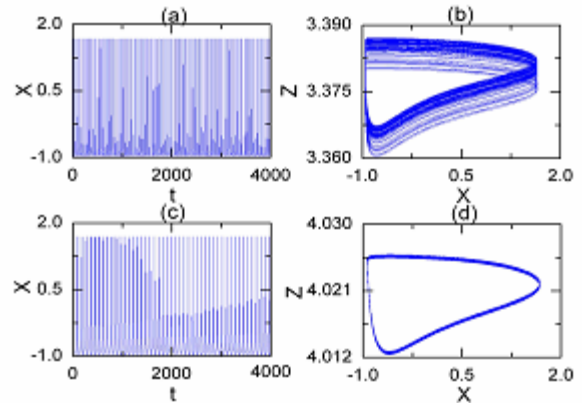


그림4. =3.3의 불규칙적인 스파이킹에서의 (a) X의 시계열과 (b) X-Z의 위상그림. =4의 규칙적인 스파이킹의 (c) X의 시계열과 (d) X-Z의 위상그림.

외부자극의 세기가 더욱 더 증가해가면, 각 버스트 안의 스파이크 개수가 늘어나면서 버스트의 길이가 점점 길어지게 된다. 외부자극이 문턱값 3.28을 넘어서면 버스트의 길이와 버스트사이의 시간간격이 같아져서 계속적으로 스파이크가 일어나는 스파이킹 상태로의 전이가 일어난다. 이 때는 스파이크사이의 시간간격이 일정하지 않은 불규칙적인 스파이킹 상태가 나타나는데, 그림4(a)와 4(b)는 =3.3일 때 불규칙적인 스파이킹 상태의 X의 시계열과 X-Z 평면에서의 위상그림을 보여주고

있다.

불규칙적인 스파이킹 상태에서 외부자극의 세기가 더 증가하면서, 문턱값 3.55를 지나면, 스파이크사이의 시간간격이 일정해지며 규칙적인 스파이킹 상태로의 전이가 일어난다. 그림4(c)와 4(d)는 $\tau=4$ 일 때 규칙적인 스파이킹 상태의 X 의 시계열과 $X-Z$ 평면에서의 위상그림을 보여주고 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 매트랩을 사용하여 뉴런 시뮬레이터를 제작했고, 이 시뮬레이터에서 외부자극의 세기를 증가시켜가며 다양한 뉴런활동을 살펴보았다. 그 결과 휴지상태에서 버스팅 또는 스파이킹과 같은 발화 상태로 전이하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 시뮬레이션을 통해서 외부자극에 대한 뉴런의 신경활동을 잘 이해할 수 있었다.

감사의 글

이 논문을 지도해 주신 김상운 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 처음부터 끝까지 많은 조언과 도움을 주신 임우창 선배님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. R. Wilson, *Spikes Decisions, and Actions* (Oxford University Press, New York, 1999)
- [2] B. R. Hunt, R. L. Lipsman, and J. M. Rosenberg, *A Guide to MATLAB* (Cambridge University Press, New York, 2001)
- [3] J. L. Hindmarsh and R. M. Rose, Proc. R. Soc. Lond, B **221**, 87 (1984)
- [4] X. J. Wang, Physica D **62**, 263 (1993)