

시냅스 웨이트 변화에 따른 계층구조 뉴런에서의 활성전위 시뮬레이션

A Simulation of Action Potential on The Hierarchical Structured Neuron
with Synapse Weight Transition

김석환* · 류광렬** · 허창우** · 이규정***

* **목원대학교 전자 및 컴퓨터공학과

***대천대학 전기 전산학부

Soke-Hwan Kim* · Kwang-Ryol Ryu** · Chang-Wu Hur** · Kyu-Chung Lee***

* **Dept. of Electronic & Computer Engineering, Mokwon Univ.

*** Dept. of Electric and Electronic Engineering, Daechon Colledge.

요 약

아홉 개의 계층구조 형태의 뉴런을 LINUX를 기초로 한 GENESIS를 이용하여 입력전류에 대한 각 뉴런의 신경전달 메카니즘을 분석하였고 마지막 뉴런에 미치는 활성전위 영향을 시뮬레이션을 해 보았다. 본 연구에서는 다른 뉴런과 연결해주며 신호를 전달해주는 시냅스의 웨이트를 중간계층 뉴런에서 적게 연결하여 비정상 상태의 뉴런을 만들어 보았다. 시뮬레이션 결과 신경세포를 전기회로적인 모델을 기준으로 설계한 뉴런은 미세한 자극의 변화에 매우 민감하게 반응 하였고, 마지막 뉴런에서는 활성전위 간격이 정상상태의 다른 세포와 비교해 보았으며, 결과적으로 뉴런의 시냅스 웨이트가 적으면 신경전달에 이상이 발생하여 세포가 손상됨을 알 수 있었다.

1. 서 론

우리의 몸을 구성하고 있는 신경조직은 뉴런, 슈만 세포, 신경교로 구성되며, 신경원은 구조 형태에 따라 뇌척수 신경절 세포의 단극성 뉴런, 안구 망막의 양극성 뉴런, 뇌, 운동신경, 자율신경세포의 다극성 뉴런으로 구성된다.

정상적인 신경세포는 자극 인가시 세포막을 기준으로 각 이온들간의 농도차에 의해 선택적 투

과성으로 신호를 전달하게 된다. 이것은 수 많은 뉴런들은 복잡한 그물 모양으로 연결되어 있기 때문에 가능하며, 신경원의 연락방식은 전방전도의 법칙에 의해 이루어지며 한 뉴런의 축색돌기는 반드시 다른 뉴런과 접촉되어 있고, 단일 뉴런에서는 흥분전도의 방향이 고정되어 있다.

II. 본 론

1. 다극성 뉴런의 전기회로 모델

뉴런의 구성은 다른 뉴런으로부터 활성전위를 전달하는 축삭, 신호를 받아들이는 수상돌기, 이온 채널에 의한 활성전위가 발생하는 세포체로 구성된다.

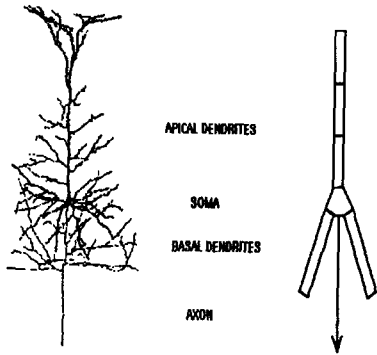


그림 1. 뉴런의 전기회로적인 모델

위 닢극성 뉴런에 대한 하나의 세포막을 기준으로 한 등가적인 모델은 Capacitance, Resistance, Voltage Source로 표현이 가능하며 전기적인 Impulse에 의해서 응답을 하게 된다. 여기서 V_m 은 막전위로서 세포 안과 밖의 전위값을 나타내며 저항성분은 conductance에 의한 가변의 채널이 된다. 신경세포의 활성전위는 이온 채널의 변화에 의해 발생되며 세포내의 전류의 흐름이 없을 경우 $-40 \sim -100\text{mV}$ 의 값을 지닌다. 세포 안과 밖의 농도의 차이는 이온의 이동에 다른 삼투압에 의해 발생하게 된다.

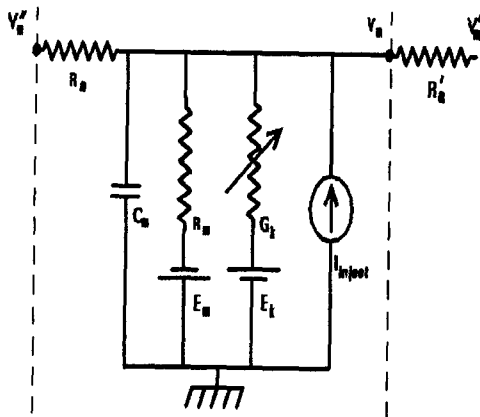


그림 2. 세포막의 전기회로 적인 표현

$$C_m \frac{dV_m}{dt} + \sum_i [(E_i - V_m)G_i] + \frac{(V_m - V_m)}{R_s} + \frac{(V_m - V_m)}{R_a} + I_{inject}$$

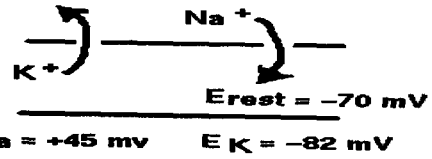


그림 3. 이온의 흐름

뉴런의 흥분성 모델은 Hodgkin-Huxley Model을 기초로 하며, 앞 그림은 뉴런 막 전위의 이온 Diagram을 보여준다. 세포 안과 밖의 농도 차이는 각 채널에 대해서 선택적 투과성에 의한 삼투압으로 발생하게 된다. 이런 농도차이를 극복하기 위해서는 세포 내에서 Pump작용을 함으로서 이루어진다.

동작에 따른 축삭의 수학적적인 모델은 아래와 같으며 각 이온에 대한 선택적 채널의 open 과 close 형태로 활성전위의 자극과 발생이 일어나게 된다.

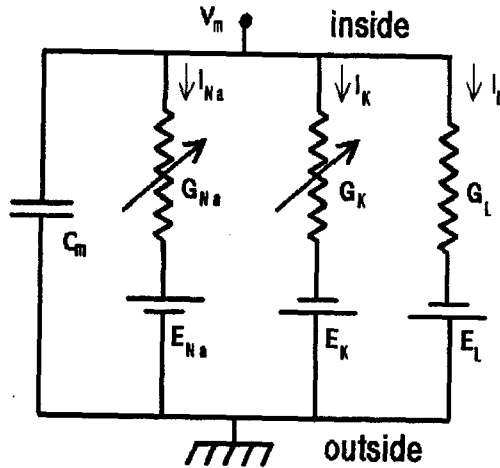


그림 4. 축삭의 전기회로 적인 표현

$$C_m \frac{dV_m}{dt} = G_{Na}(E_{Na} - V_m) + G_K(E_K - V_m) + G_L(E_L - V_m) + I_{inject}$$

III. 시뮬레이션 및 결과

본 연구에서는 9개의 뉴런을 계층구조 형태로 구성하였다. 뉴런과 뉴런사이를 연결하는 시냅스는 신호를 전달하는 중요한 연결매체이므로 만일 시냅스의 수가 부족한 상태 또는 신경이 끊어진 상태에 놓여 있을 때 인가된 신호에 대한 뉴런의 활성전위 변화를 살펴 보았다. 계층구조로 된 뉴런들은 하위계층 뉴런의 시냅스 웨이트 100, 중간 계층 뉴런의 시냅스 웨이트 1, 상위계층 뉴런 시냅스 웨이트 100개를 연결하고 일정한 전류를 주

었다.

시뮬레이션 결과 하위계층의 뉴런에서는 정상적인 활성전위와 안정상태를 보였으나 중간계층의 뉴런에서는 웨이트 수를 1로 하였기 때문에 하위 계층에서 발생한 신호를 활성전위로 변화시켰지만 안정상태에는 도달하지 못했으며, 상위계층 뉴런에서는 중간계층 뉴런의 신호가 계속적으로 인가되어 활성전위가 하위계층 보다는 자주 발생을 하였다.

인가된 신호에 대한 뉴런의 정상적인 동작은 세포막을 기준으로 한 이온들의 선택적 투과성인 삼투압 작용으로 활성전위를 발생시킨다. 본 연구에서 살펴본 뉴런에서는 신호를 전달하는 시냅스 웨이트 수가 부족한 상태, 신경이 손상되었을 때 외부에서 자극이 있을 경우 상위계층 뉴런에서는 활성전위가 자주 발생하여 근육마비 및 고열등을 일으킬 수 있음을 시뮬레이션을 통해 알 수 있었다. 운동신경의 손상이 발생할 경우, 병원에서 실시하는 근전위도 검사(EMG)는 일반적으로 정상상태의 사람의 신경전달의 파형을 비교해서 출력되는 신호의 간격과 출력 전압으로 정상과 비정상상태를 판단하게 된다.

본 연구에서 주 목적은 근전위도 검사에서 얻는 데이터와 시뮬레이션 결과를 참조하여 신경의 이상이 발생한 뉴런의 위치와 원인을 분석하여 환자에게 적절한 처방을 내릴 수 있는 자료가 되기를 바란다.

[시뮬레이션 DATA]

Resting Membrane Potential = -70mV

Input Current : 0.03 mA

결합구조 : 계층구조

L1, L2, L3 : 최 하위 계층 뉴런.

M1, M2, M3 : 중간 계층 뉴런.

R1, R2, R3 : 상위 계층 뉴런.

시냅스 웨이트 수

L1, L2, L3 : 100개 (정상상태 뉴런)

M1, M2, M3 : 1개 (비 정상상태 뉴런)

R1, R2, R3 : 100개 (정상상태 뉴런)

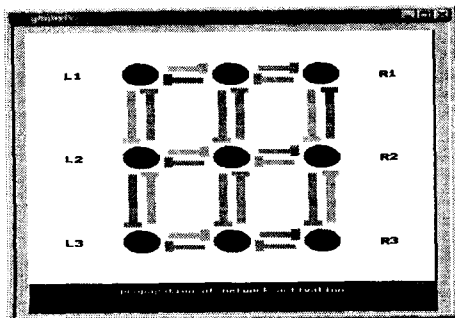


그림 5. 계층 결합구조의 뉴런

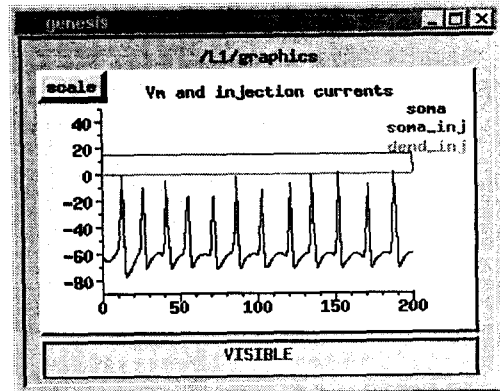


그림 6. 하위 계층 뉴런 L1

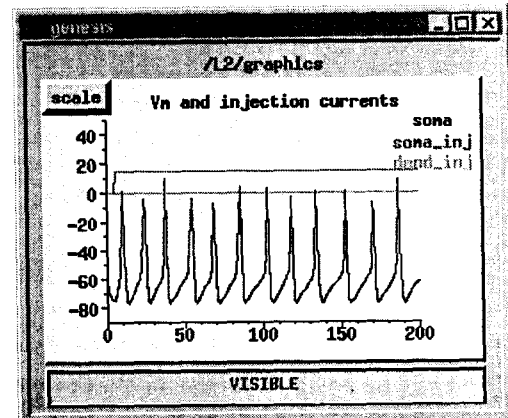


그림 7. 하위 계층 뉴런 L2

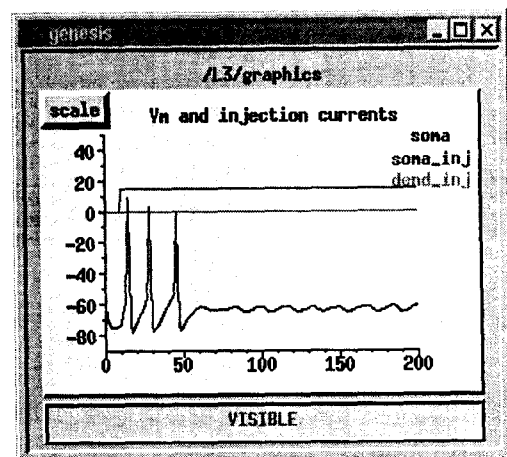


그림 8. 하위 계층 뉴런 L3

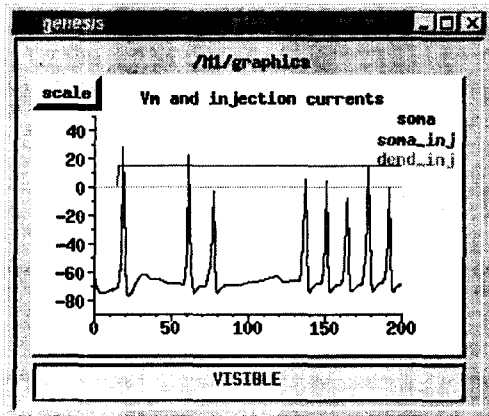


그림 9. 중간 계층 뉴런 M1

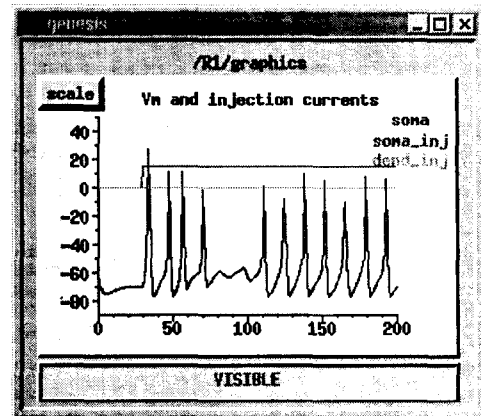


그림 12. 상위 계층 뉴런 R1

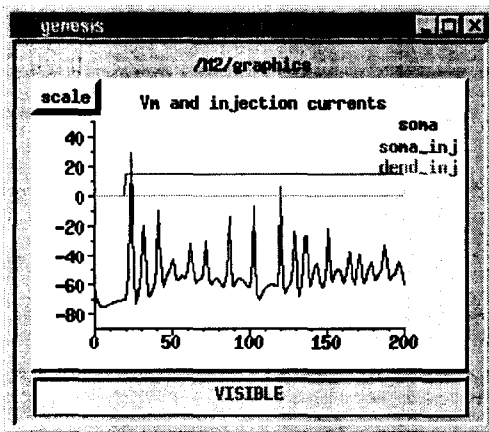


그림 10. 중간 계층 뉴런 M2

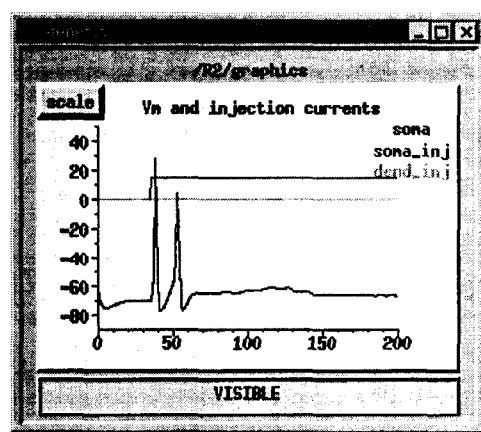


그림 13. 상위 계층 뉴런 R2

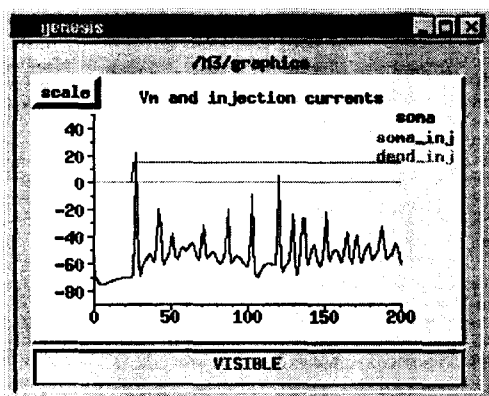


그림 11. 중간 계층 뉴런 M3

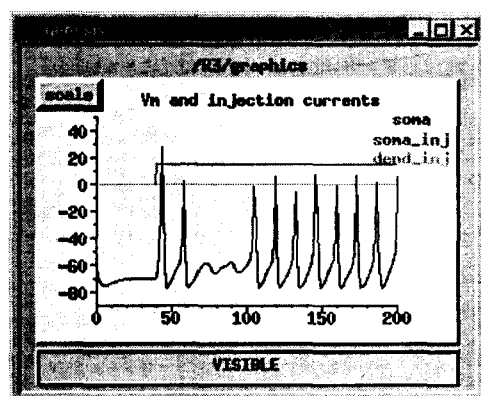


그림 14. 상위 계층 뉴런 R3

IV. 결 론

구조형태에 따른 뉴런의 분류는 단극성, 양극성, 다극성 세포로 나뉘는데 본 연구에서는 다극성 세포인 운동신경 뉴런을 이용하여 시냅스 연결상태가 비 정상적으로 연결된 뉴런에 일정한 자극을 주었을 때 발생하는 활성전위에 대해서 살펴 보았다.

신경전달 메카니즘은 외부에서 자극 인가시 세포막을 기준으로 한 선택적 투과성 전달 과정을 거치게 되는데 신경과 신경을 연결하는 시냅스가 이상이 발생할 경우 전달과정의 메카니즘에 이상이 발생할 수 있다. 운동을 심하게 하였을 경우 세포 막과 안 사이의 심한 이온농도 차이에 의한 근육 마비와 과열증세, 목마름 증세가 발생하지만, 만일 신경세포에 손상이 발생하였다면 외부 자극에 대해서 이상한 반응이 생길 것이다. 그러므로 본 논문에서는 이런 상황을 고려하여 만일 신경세포간의 연결이 완전하지 않은 상태에서 자극이 발생했다면, 세포에서 발생할 수 있는 상황을 GENESIS를 이용하여 시뮬레이션 해 보았다. 병원에서 실시하는 근전도(EMG) 경우에는 일정한 전류를 흐르게 하여 이때 근육이 반응하는 신경계의 이상 유무를 판단하게 된다. 정상적인 사람이 느끼게 되는 자극과 출력된 파형의 전압과 time delay를 기준으로 판단하게 되는데 이는 어느 부위에 이상이 있다는 자료가 된다.

신경간의 연결상태를 하위계층과 상위계층의 뉴런에게는 시냅스 웨이트를 100개, 중간계층 뉴런에서의 시냅스 웨이트를 1개를 주고 전류를 흐르게 할 경우, 시뮬레이션 결과 하위계층에서는 정상적인 신호가 검출되었으며, 중간계층에서의 뉴런에서는 활성전위가 발생 후 다른 뉴런에게 신호를 전달하여야 하지만 신호 전달 매체인 시냅스의 수가 적어 안정상태로 되돌아 오기 힘들음을 볼 수 있었다. 상위 계층의 뉴런에서는 다른 뉴런과 비교해서 활성전위가 자주 발생하였다. 이는 뉴런과 뉴런사이를 연결하며, 신호전달 매체인 시냅스가 상대적으로 부족하여 신호전달상태에 이상이 발생함을 보여주는 것이고 신경전달의 과정은 시냅스가 중요한 역할을 한다는 것이다. 또한 시냅스에 손상이 있다면 다른 신경에도 이상을 초래 할 수 있는 원인이 됨을 나타낸다.

참고문헌

- [1] Joseph J. Carr, John M. Brown. 이명호 역. "의용계측 설계" 2000.
- [2] Joseph D. Bronzino. "The Biomedical Engineering Handbook" 1996.
- [3] 이동명, 이한기 "인체 해부학" 1990.
- [4] James M. Bower. David Beeman. " The Book of GENESIS Second Edition" 1997.
- [5] Eric R. Kandel James H. Schwartz Thomas M. Jessell " Principle of Neural Science Third Editon "
- [6] Bert Sakmann and Michael Hausser. " Action potential initiation and backpropagation in neurons of the mammalian CNS " 1997.
- [7] <http://bbb.caltech.edu/GENESIS>