

임펄스 패턴 변화에 따른 집단신경세포의 정보처리 특성

김 용 만 · 이 경 중 · 이 명 호

= Abstract =

Information Processing Characteristic for Changes in Impulse Patterns in the Neuron Pool

Yong-Man Kim, Kyung-Joong Lee, Myoung-Ho Lee

This paper describes the mechanism of information processing in the nervous system through neuron pool model which is consisted of six single neural models. In the neuron pool model, summation characteristic of stimulus satisfies those of real nervous system and output impulse rate increases linearly to the input stimulus.

Occlusion phenomena of the neuron pool model is approached to those of real nervous system and also if the threshold potential within subliminal fringe is increased, facilitation phenomena appeared.

Therefore, the results of this study suggest that we can construct large neuron pool with many single neural models and verify the mechanism of information processing in the wide part of nervous system.

1. 서 론

여러개의 단일신경세포(single neuron)로 이루어지는 집단신경세포(neuron pool)에서 일어나는 정보처리 특성에 관한 研究는 1961년 Josephson, worthy 등에 의해 始作된 以來 1972年 Freemann의 단일신경세포에서의 정보처리특성 研究 1976年 Nachmansohn의 흥분성신경세포와 억제성신경세포의 相互接合으로 이루어지는 집단신경세포에서의 정보처리특성 해석에 이르기까지 많은 研究가 進行되었다. 따라서 본 研究에서는 단일신경세포에 대한 電氣의 모델을 구성하고 이 신경모델에서의 정보처리 特性을 입력자극의 주파수, 자극의 크기 및 자극의 지속시간을 各各 獨立의으로 變化시킬때 일어나는 出力임펄스 패턴의 變化를 考察하여 單一神經細胞에서 일어나는 情報處理 메카니즘을 究明하여 報告자 하며, 또한 이들 單一神經모델로 이

<1981. 12. 2. 접수>

연세대학교 전기공학과

Dept. of Electrical Eng. Yonsei University

* 本稿는 大韓電子工學會 秋季學術大會에서 發表한 論文임

우어지는 集團神經細胞에서 흥분성 및 억제성 입력에 따른 出力임펄스패턴의 變化를 考察하여 봄으로써, 集團神經細胞에서 이루어지는 情報處理 메카니즘의 일부를 밝혀보고자 한다.

2. 神經細胞의 情報傳達

神經細胞에서 일어나는 情報傳達過程은 外部로 부터 들어오는 情報를 수집하는 入力機能의 수상돌기와 細胞體, 細胞體에서 加重(summation)되어진 電氣임펄스를 傳達하는 傳達經路의 축색(axon), 축색을 通하여 傳達된 電氣임펄스를 다른 神經細胞나 筋肉등 말단기관에 傳達하는 출력기능의 축색종단등 세 단계로 나뉘는데 그림 2-1은 이 過程을 圖示한 것이다.

한편, 여러개의 시냅스전섬유(presynaptic fiber) 및 시냅스후섬유(postsynaptic fiber)들이 밀집되어 있는 集團神經細胞의 자극전달 特性은 여러 시냅스를 通해 들어오는 자극이 계속적으로 加重(summation)되는 形態로 測定할 수 있다.

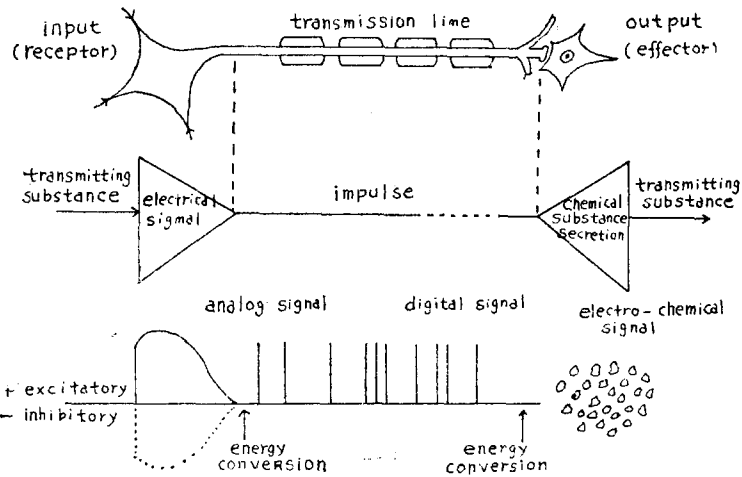


그림 2-1. 신경세포의 자극전달과정
Fig. 2-1. Transmitting process of stimulus in a single neuron

3. 實 驗

(1) 實驗裝置의 構成

單一神經細胞 및 集團神經細胞에서 일어나는 情報處理 메카니즘을 研究, 考察하기 爲하여 構成한 實驗裝置의 블럭선도는 그림 3-1과 같다.

(2) 자극 발생장치

神經모델에 加하는 입력자극을 얻기 위해 그림 3-2(a)에서와 같이 8 MHz의 수정발진회로에서 發生된 펄스는 카운터로 연결하여 분주회로, JK 플립-플롭 및 AND 게이트를 거치는 동안 펄스의 지속시간을 固定시

키고 周波數와 크기만을 各各 變化시킬 수 있는 出力을 얻게하였다. 또한 펄스의 지속시간만을 變化시킬 경우의 出力을 얻기 위해 그림 3-2(b)와 같이 비교기 回路를 構成하여 DC 레벨의 基準入力を 조절함으로써 周波數와 크기가 一定하고 펄스의 지속시간만을 變化시킬 수 있는 出力을 얻을 수 있게 하였다. 표 3-1은 製作한 자극발생장치의 시험특성을 나타낸 것이다.

표 3-1. 자극 발생 장치의 특성
Table 3-1. Specifications of stimulator

Pulse repetition rate	2~2000[Hz]
Pulse duration	1.0[ms]~0.5[sec]
Amplitude	0~±5[V]

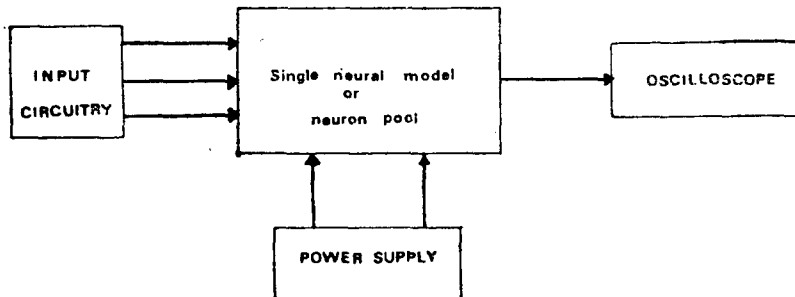


그림 3-1. 실험장치의 블럭선도
Fig. 3-1. Block diagram of main experimental system

표 3-3. 입력 자극의 크기 변화에 대한 신경모델의 응답변수 값

Table 3-3. Responses of a single neural model to increased amplitude of stimulus

Input			Output		
F[Hz]	D _i [msec]	A _i [v]	D _o [msec]	A _o [v]	N[number]
26	20	0.4	0.1	0.6	2
26	20	0.6	0.1	0.6	8
26	20	1.4	0.1	0.6	22
120	4	0.8	0.3	1.4	3
120	4	1.2	0.3	1.4	5
120	4	1.5	0.3	1.4	13
400	1.2	0.8	0.2	2.0	8
400	1.2	1.5	0.2	2.0	10
400	1.2	2.0	0.2	2.0	16

표 3-4. 입력 자극의 지속시간 변화에 대한 신경모델의 응답변수 값

Table 3-4. Responses of a single neural model to increased duration of stimulus

Input			Output		
F[Hz]	D _i [msec]	A _i [v]	D _o [msec]	A _o [v]	N[number]
40	4	1.0	0.1	1.5	2
40	6	1.0	0.1	1.5	6
40	8	1.0	0.1	1.5	8
100	2	1.0	0.2	1.5	4
100	6	1.0	0.2	1.5	16
100	12	1.0	0.2	1.5	42
150	5	5.0	0.1	1.8	11
150	18	5.0	0.1	1.8	56
150	40	5.0	0.1	1.8	120

표 3-5. 입력 자극의 주파수 변화에 대한 신경모델의 응답변수 값

Table 3-5. Responses of a single neural model to increased frequency of stimulus

Input			Output		
F[Hz]	D _i [msec]	A _i [v]	D _o [msec]	A _o [v]	N[number]
2	30	0.8	0	0	0
16	30	0.8	0.2	0.7	13
32	30	0.8	0.2	0.7	22
64	30	0.8	0.2	0.7	27
128	30	0.8	0.2	0.7	32
2	3	1.6	0.3	1.8	3
16	3	1.6	0.3	1.8	7
32	3	1.6	0.3	1.8	10
64	3	1.6	0.3	1.8	12
128	3	1.6	0.3	1.8	21

표 3-2. 신경모델의 응답특성

Table 3-2. Responses of a single neural model

Design model	Threshold voltage [v]	Frequency [Hz]	Time delay [msec]	Relative refractory period [msec]	Absolute refractory period [msec]	Time constant of integrator [msec]	Amplitude [v]
#1	0.3	2.3~900	0.5	0.4	1	1	0.2~3.0
#2	0.3	2.0~1.2k	0.5	0.6	10	10	0.2~3.0
#3	0.3	1.6~900	0.5	0.4	1	1	0.1~3.0
#4	0.3	1.8~1.1k	0.5	0.4	1	1	0.1~3.0
#5	0.3	2.4~700	0.5	0.6	10	10	0.2~3.0
#6	0.3	1.5~1k	0.5	0.4	1	1	0.1~3.0

集團神經細胞를 이루고 있는 神經細胞 사이의 相互連結方法에 따라 여러가지 方式으로 좀 더 나누어 질 수 있다. 본 實驗에서는 그림 3-4에서와 같이 흥분성 구심성신경 입력(excitatory afferent nerve input)과 억제성 구심성신경 입력(inhibitory afferent nerve input)의 두 가지 入力方式을 택하였으며 集團神經細胞를 構成하고 있는 神經細胞모델 사이의 相互連結을 하지 않았다. 따라서 흥분성일 때 세가지, 억제성일 때

세 가지 모두 9가지의 方式으로 나누게 하였으며 各各의 경우에 對하여 單一神經모델에서와 같이 입력 자극의 크기, 자극의 지속시간 및 자극의 周波數등을 變化시킬때 應答되는 出力 임펄스의 發生비트數와 발화되는 神經의 數를 조사하였다. 이때 加重特性을 보다 명확히 확인하기 爲하여 입력 자극의 加重이 negative 일 경우는 接地端子와 바꾸어 주었다. 이로 인하여 입력 자극의 疊의 절대치가 문턱전위보다 크면 活動電位가

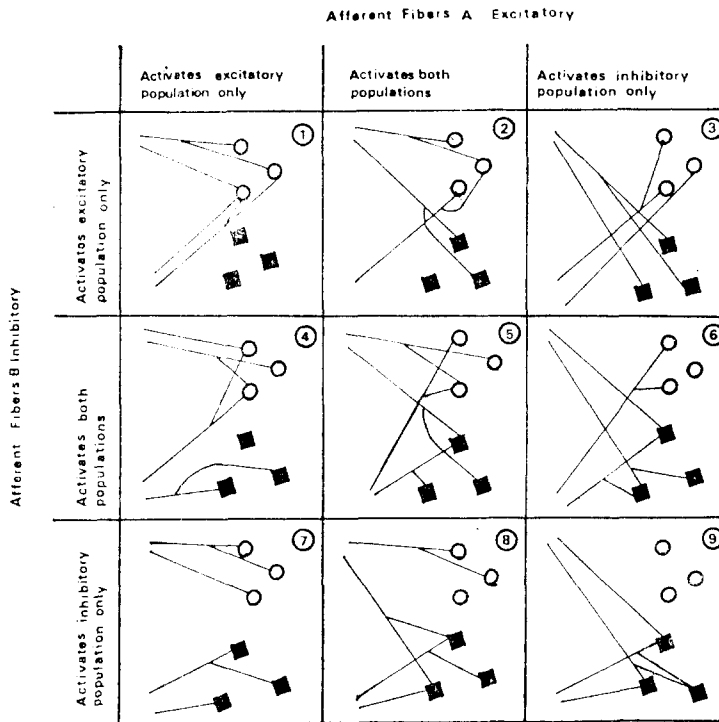


그림 3-4. 집단신경 모델의 연결방식

Fig. 3-4. Input configuration types of neuron pool

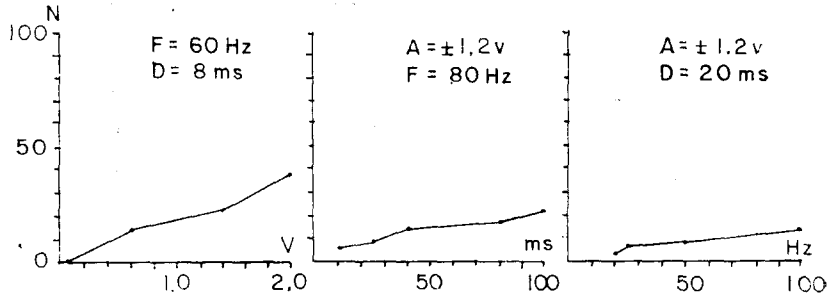


그림 3-5. 입력이 모두 ENM 으로 들어가는 경우의 출력패턴
Fig. 3-5. Output patterns for the case of (1) in Fig. 3-4

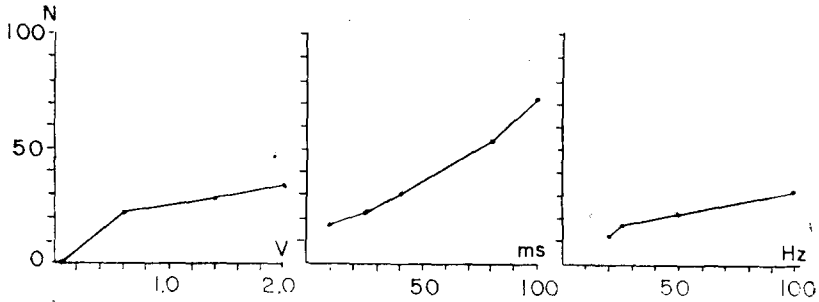


그림 3-6. 흥분성 입력은 ENM 과 INM 으로, 억제성 입력은 INM 으로 들어가는 경우의 출력패턴
Fig. 3-6. Output patterns for the case of (2) in Fig. 3-4

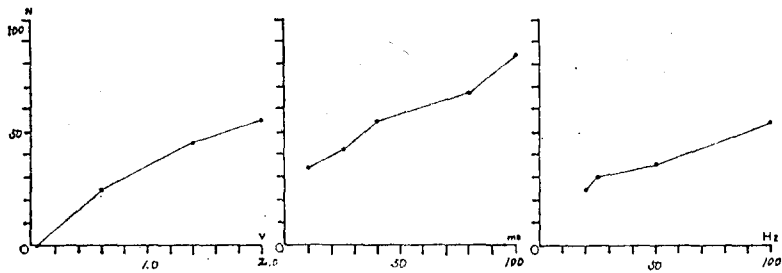


그림 3-7. 흥분성 입력은 INM 으로, 억제성 입력은 ENM 으로 들어가는 경우의 출력패턴
Fig. 3-7. Output patterns for the case of (3) in Fig. 3-4

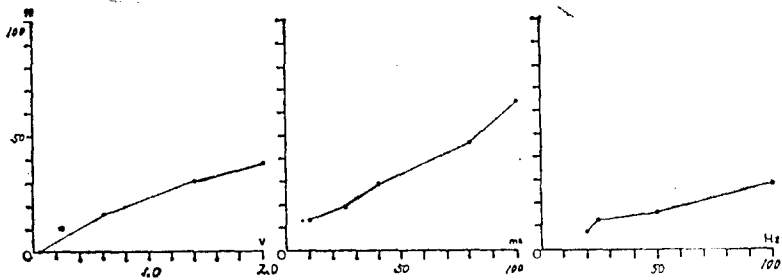


그림 3-8. 흥분성 입력은 ENM 으로, 억제성 입력은 ENM 과 INM 으로 들어가는 경우의 출력패턴
Fig. 3-8. Output patterns for the case of (4) in Fig. 3-4

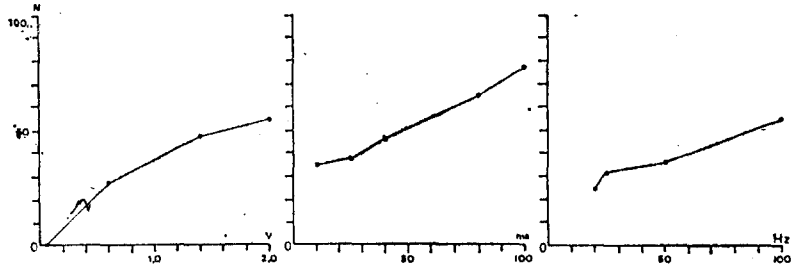


그림 3-9. 흥분성 및 억제성 입력이 ENM 과 INM 으로 나뉘어 들어가는 경우의 출력패턴
Fig. 3-9. Output patterns for the case of (5) in Fig. 3-4

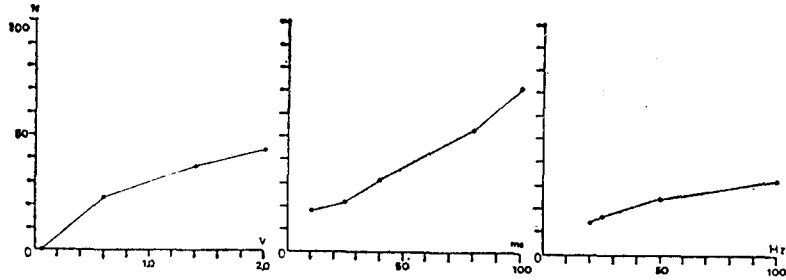


그림 3-10. 흥분성 입력은 INM 으로, 억제성 입력은 ENM 과 INM 으로 들어가는 경우의 출력패턴
Fig. 3-10. Output patterns for the case of (6) in Fig. 3-4

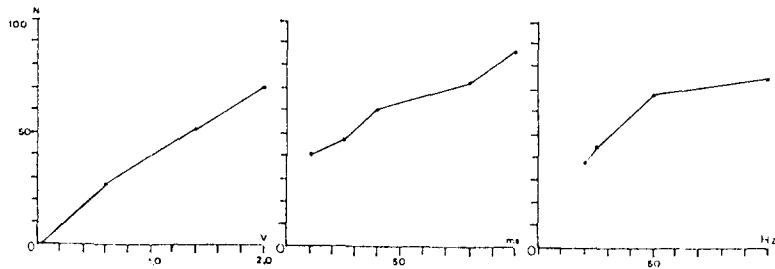


그림 3-11. 흥분성 입력은 ENM 으로, 억제성 입력은 INM 으로 들어가는 경우의 출력패턴
Fig. 3-11. Output patterns for the case of (7) in Fig. 3-4

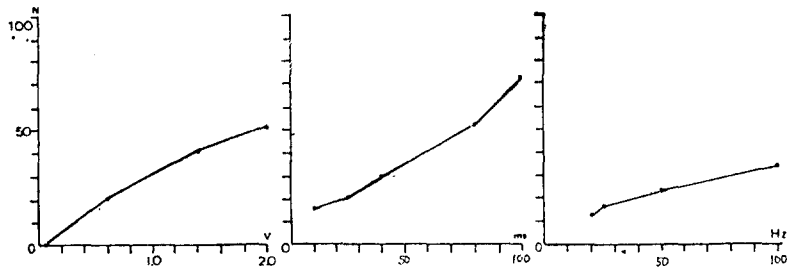


그림 3-12. 흥분성 입력은 ENM 과 INM 으로, 억제성 입력은 INM 으로 들어가는 경우의 출력패턴
Fig. 3-12. Output patterns for the case of (8) in Fig. 3-4

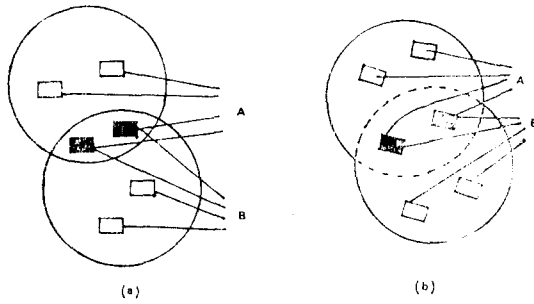


그림 3-14. 두개의 흥분성 입력을 갖는 집단신경세포
Fig. 3-14. Neuron pool with two excitatory stimulus.

델의 문턱전위인 0.4[v]를 넘는 0.7[v]의 자극이 들어 오게 되므로 활동전위를 일으키게 되었다. 表 3-7에서 볼 수 있듯이 이 集團神經細胞모델은 神經의 生理的인 현상인 occlusion 및 facilitation 특성을 만족하였다.

4. 結果 考察

單一神經細胞의 電氣의 모델의 製作과 이 電氣의 모델에서의 입력자극의 크기, 자극의 지속시간 및 자극의 周波數등의 變化에 對한 應答特性和 이틀 單一神經 모델 6개로 構成된 集團神經回路網에서 얻어진 結果는 다음과 같이 考察되었다.

(1) 單一神經細胞모델의 자극의 크기

表 3-3과 사진 1에 나타난 것처럼 자극의 크기를 증가시키에 따라 활동전위의 크기는 일정하지만 그의 발생 빈도수는 증가하였고 입력자극의 세기가 문턱값 이하인 0.15[v]의 경우에는 활동전위가 발생하지 않았는데 이것은 神經細胞에서 “all or none”법칙, 즉 자극

의 크기가 神經細胞의 문턱전위보다 낮으면 자극의 지속시간 周波數 및 크기에 관계없이 활동전위가 발생되지 않는 神經細胞의 특성을 만족하였다.

(2) 單一神經細胞모델의 자극의 지속시간

表 3-4와 사진 2에 나타난 것처럼 자극의 지속시간이 증가하면 활동전위의 크기는 일정하지만 그의 발생 빈도수는 증가하였는데 이 경우에는 자극의 周波數와 크기가 일정할 때 자극의 지속시간이 길어지면 활동전위의 발생 빈도수는 증가하는 神經細胞의 “strength-duration” 특성을 만족하였다.

(3) 單一神經細胞모델의 자극의 周波數

表 3-5와 사진 3에 나타난 것처럼 자극의 周波數가 증가함에 따라 神經細胞모델의 활동전위의 크기는 일정하지만 그의 발생빈도수는 증가하였는데 이것은 자극의 周波數를 증가시키면 발생하는 활동전위의 크기는 변하지 않고 그의 발생빈도수만을 증가시키는 生理的 특성을 만족하였다.

(4) 集團神經細胞모델

실제 集團神經細胞에서 일어나는 여러가지 生理的인 현상중에서 subliminal fringe 및 空間的 加重과 occlusion 및 facilitation 에 限하여만 實驗하였다. 實驗의 結果에 나타난 것처럼 입력자극의 크기가 증가함에 따라, 자극의 지속시간이 길어짐에 따라 자극의 周波數가 높아짐에 따라 활동전위의 발생빈도수가 증가하였다.

(5) 흥분성 입력(+V)과 억제성 입력(-V)이 동시에 들어가는 경우에는 두 入力의 差가 문턱전위를 넘어야만 활동전위가 발생하였다. 이는 神經細胞모델이 加重特性和 “all or none”법칙을 만족하고 있음을 나타낸 것이다.

(6) 또한 발화신경세포의 수가 같은 경우라 할지라도 가중된 입력자극의 세기에 따라 활동전위의 발생빈도수는 다르게 나타났다. 그림 4-1은 集團神經細胞모델의 9가지 方式에서 얻어진 임펄스패턴을 종합한 結

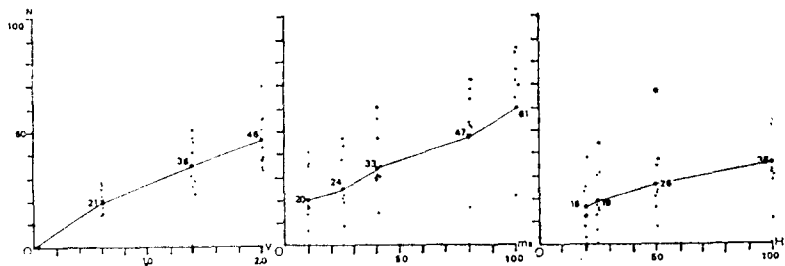


그림 4-1. 집단신경회로의 출력 임펄스 패턴
Fig. 4-1. Output impulse patterns of neuron pool

果이다. 자극의 크기, 지속시간 및 주파수 변화에 대한 活動電位의 발생빈도수의 전체적인 패턴은 입력 자극의 증가에 따라 대체로 線型성을 유지하며 增加하였다.

(7) Occlusion 實驗에서는 實驗모델이 表 3-7에서와 같이 실제 神經細胞와 유사한 動作을 보였으며 facilitation 實驗에서는 subliminal fringe 內에 있는 神經細胞모델의 문턱전위를 다른 神經細胞모델보다 약간 높여 주어야만 실제 神經細胞와 유사한 動作을 보였다.

5. 結 論

본 研究는 神經系에서 이루어지고 있는 情報處理 메카니즘을 單一神經細胞와 이들로 構成된 集團神經回路網의 電氣的 모델을 통하여 밝혀진 것으로 얻어진 結果는 다음과 같다.

1. 單一神經細胞에서 자극의 크기, 자극의 지속시간 및 자극의 周波數등이 增加하면 活動電位의 크기는 일정하지만 그의 發生빈도수는 增加하였다.

2. 자극의 크기가 문턱전위보다 낮으면 자극의 주파수나 지속시간의 變化에 관계없이 活動電位가 發生하지 않는 "all or none"법칙을 만족하였다.

3. 자극의 지속시간 증가에 의해 活動電位의 발생빈도수가 增加하는 "strength-duration"관계를 만족하였다.

4. 集團神經細胞모델에서 입력자극의 加重에 의한 出力特性을 나타냈으며 出力임펄스의 發生은 입력자극에 對해 線型성을 가진 증가형태를 나타내었다.

5. 集團神經細胞모델은 生理的 현상인 occlusion 特性을 만족하였으며 subliminal fringe 內의 神經細胞모델의 문턱전위를 높이면 facilitation 特性도 만족하였다.

以上的 實驗結果로 單一神經細胞모델의 情報處理特性을 電氣的 모델을 통하여 밝혀볼 수 있었으며 한 개의 神經細胞에서 傳達된 자극을 神經의 넓은 부위에 傳達하는 中間媒介로서의 集團神經細胞의 모델화 可能性을 提示하였다. 따라서 본 實驗에서 使用된 神經細胞 모델을 좀 더 확장하여 회로의 단순화 소형화 사용 전원의 단일화 入出力電位의 저레벨화, 모델변수의 단일화, 소모전류의 극소화 문제등을 改善할 수 있다면 대규모적인 集團神經細胞를 構成할 수 있을 것이며 神經系의 넓은 부위에서 일어나는 情報處理 메카니즘을 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) Hodgkin, A.L. and Huxley, A.F., 1952a, "Currents carried by sodium ions through the membrane of the giant axon of *Loiglo*," *J. physiol.*, Vol. 116, pp.449-472.
- 2) Hodgkin, A.L. and Huxley, A.F., 1952b, "The components of membrane in the giant of *Loligo*," *J. Physiol.* Vol. 116, pp.473-496.
- 3) Hodgkin, A.L. and Huxley, A.F., 1952c, "The dual effect of membrane potential on sodium conductance in the giant axon of *Loligo*", *J. Physiol.*, Vol., 116, pp.497-504.
- 4) Hodgkin, A.L. and Huxley, A.F., 1952d, "A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve," *J. Physiol.* 117, pp.500-544.
- 5) Sabah, H.H. & Spangler, R.A., "Repetive response of the hodgkin Huxley model for the squid giant axon," *J. Theor. Biol.*, Vol.29, pp. 155-171, 1970.
- 6) French, A.S. & Stein, R.B.: "A flexible neural analog using integrated circuits," *IEEE Trans. Vol. BME-17*, pp. 248-253, 1970.
- 7) Roy, G.: "A simple electronic analog of the squid axon membrane: The Neuro FET," *IEEE Trans. Vol. BME-19*, pp. 60-63, 1972.
- 8) Pottla, E.W., Colburn, T.R. & Humphrey, D. R.: "A dendritic compartment model neuron," *IEEE Trans. Vol. BME-20*, pp. 132-139, 1973.
- 9) Hallgren, R.: "Analog model of a passive myelinated nerve fiber," *IEEE Trans. Vol. BME-20*, pp. 472-474, 1973.
- 10) Thexton, A.J.: "A modification of the french and stein neural analog," *IEEE Trans. Vol. BME-21*, pp. 339-341, 1974.
- 11) Brise, S.C. & Bittmer, G.D.: "Regeneration of giant axons in earthworms," *Brain Research*, Vol. 113, pp.575-581, 1976.
- 12) Kline, J.: *Biological foundations of biomedical engineering.* Little, Brown and Company, pp. 415-672, 1976.

- 13) Myoung-Ho Lee & Sang-Hui Park, "*Electrical simulation for changes in impulse patterns across multi-neural synapses,*" *Journal of KOSOMBE, Vol. 1, No. 1, pp.37-46, 1980.*
- 14) Brockman, W.H.: "*A simple electronic neuron model incorporation both active and passive responses,*" *IEEE Vol. BME-26, pp. 635-639 1979.*
- 15) Kousei Maeda, Tsuneo Yagi & Akira Noguchi, "*Induced excitation and synchronization of nerve impulses in two parallel unmyelinated fibers,*" *IEEE Trans. Vol. BME-27, pp. 139-145, 1980.*
- 16) Yozo Hirai: "*A new hypothesis for synaptic modification: An interactive process between postsynaptic competition and presynaptic regulation,*" *Biol. Cybernetics Vol. 36, pp. 41-50, 1980.*

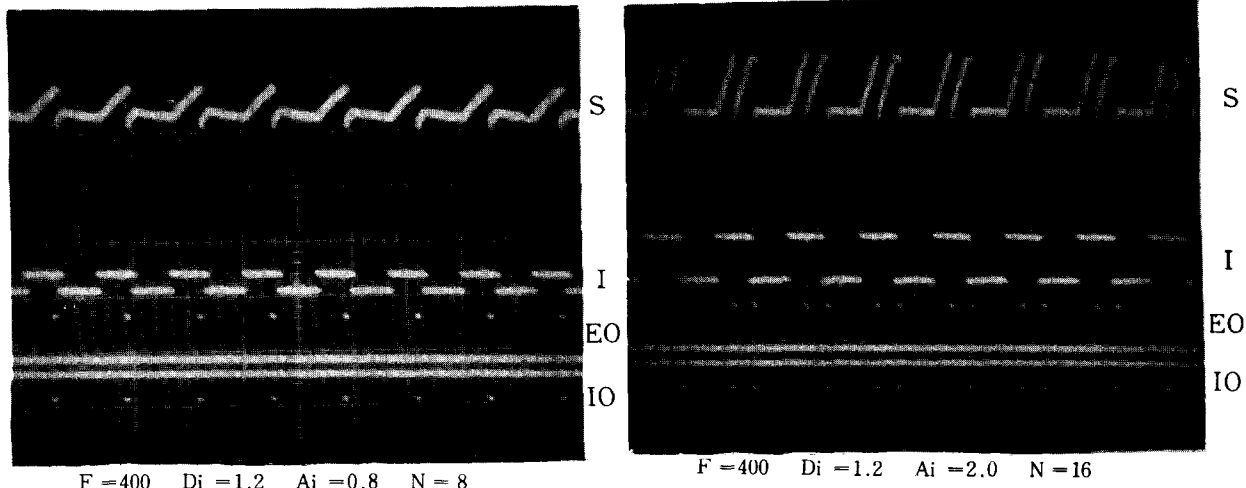


Photo. 1. Output impulse patterns for stimulus of different amplitude.

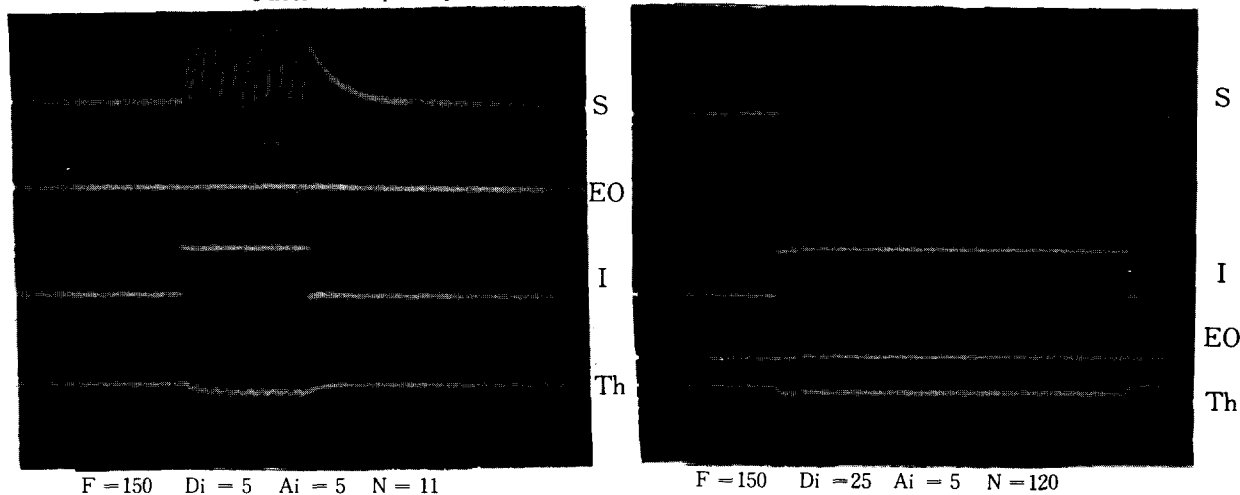


Photo. 2. Output impulse patterns for stimulus of different duration.

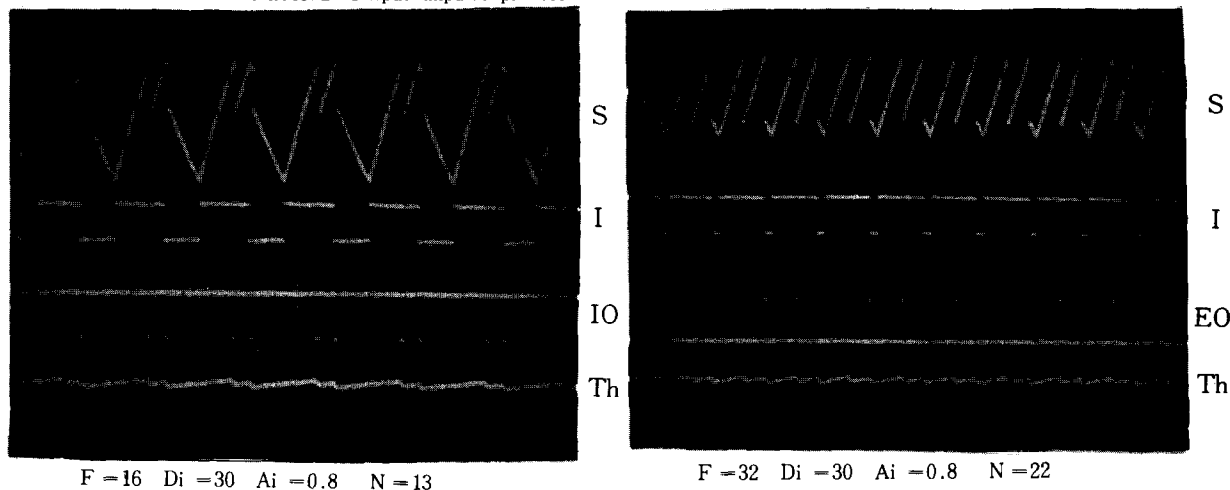


Photo. 3. Output impulse patterns for stimulus of different frequency.