

神經徑路의 情報處理에 대한 電氣의 特性 研究

論 文
28~8~3

—神經의 電氣모델 設計를 中心으로—

Electrical Analysis on the Information Processing in Neuronal Synapses with Special Reference to the Electrical Neuronal Model Design

朴 相 晞* · 李 明 鎬**
Sang Hui Park · Myoung Ho Lee

Abstract

This paper describes electrical analysis of the information processing of the nervous system. A general-purpose electrical neuronal model for simulating the electrical activity in a single nerve cell and in small groups of nerve cell has constructed.

This model consists of two basic electronic modules to represent respectively a "cell body" and an "axon (with synapses)", together with various related appurtenances. The primary advantages of this method are; holistic view, actual physical representation of various electrical activities in a single nerve cell, display of the activity of all nerve cells simultaneously, flexibility with respect to network parameters.

Moreover, this model can effectively help push forward our general ability to explore and conceptualize the electrical activity of interconnected networks of nerve cell behaving in concert. Also, this electronic module technique is the best of various means for this task of realistic representation of aggregates of neurons.

I. 緒論

神經系(nervous system)에서 이루어지고 있는 情報處理의 메카니즘을 밝혀보려는 노력은 개구리의 神經과 筋肉을 도선으로 연결하여 收縮運動에 관한 실험을 수행한 이래 神經의 시냅스 접합이론, 生體內에서의 膜電位(membrane potential), 活動電位(action potential) 및 문턱전위(threshold potential)의 측정에 이르기까지 대부분의 研究者들은 주로 神經細胞의 電氣의인 興奮特性和 刺戟의 傳達過程 및 神經機構의 生成에 관하여 研究하였다.

그러나 神經系에서의 情報處理 現象은 神經細胞의 단순한 조합만이 아니라 여러개의 神經細胞가 접합되어 복잡한 神經回路網을 構成함으로써 수행되기 때문에 보다 解析의이고 回路體系的인 研究방법이 要求되고 있다. 따라서 本 研究에서는 神經系에서 情報處理

特性 解析을 위한 基礎研究로서 神經系의 構成要素인 神經細胞의 電氣의 等價모델을 實現하고 이 모델을 통하여 神經細胞의 情報處理 메카니즘으로 알려진 자극의 빈도수, 자극의 지속시간 및 자극의 크기변화에 따른 모델의 應答變數를 측정하여 神經細胞의 特性和 비교하여 봄으로써 神經系에서 일어나는 情報處理 메카니즘의 일부를 解析해 보고져 하며 生體組織과 機能에 대한 보다 유사한 시스템 構成의 可能性을 提示하여 보고져 한다.

II. 神經細胞의 情報傳達

經神經細胞는 細胞體(cell body 혹은 soma)와 여러개의 突起로 되어 있으며 이들 突起에는 比較的 굵고 짧은 樹狀突起(dendrite)와 가늘고 긴 軸索突起(axon)의 2種類가 있다. 그림 1은 神經細胞의 形態를 나타내고 있는데 이것은 神經系에 存在하는 부위에 따라 그 形態가 매우 다양하나 대개는 3가지로 分類된다.

또한 각 形態의 神經細胞에서의 情報處理 過程도 3단

* 正會員: 延世大工大 電氣工學科 教授(工博), (當學會 編修委員)

** 正會員: 弘益大工大 電氣工學科 助教授(工博)

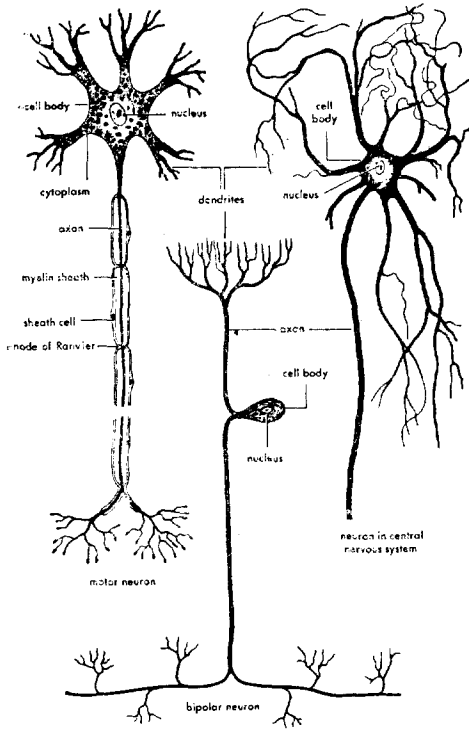


그림 1. 神經細胞의 3가지 形態⁽¹⁾
 Fig. 1. Three neurons of the mammalian nervous system

계⁽²⁾로 이루어진다.

첫째로 人體의 內部 혹은 外部로부터 어떤 특정한 부위에 刺戟을 받게 되면 이곳의 生理的 機能을 制御하는 神經細胞의 입력(input) 기능인 樹狀突起와 細胞表面 등의 受容器(receptor)에 아나로그 信號로 바뀐 刺戟 情報가 들어가게 된다. 이 아나로그 信號는 細胞體의 中心에서 加重(summation) 되어 디지털 임펄스 信號로 변하게 된다. 두번째는 細胞體에 누적되어 있는 디지털 임펄스 信號를 출력(output) 기능을 갖는 부위로 傳達하기 위하여 傳達徑路(transmission pathway)에 해당되는 軸索(axon)으로 보내지게 되며, 마지막으로 軸索에 전달된 디지털 임펄스 信號를 최종 출력단인 軸索終端(axon-end plate)으로 보내게 되며 이곳을 통하여 다른 細胞體나 筋肉 등의 效果器(effector)에 계속적으로 刺戟이 傳達된다. 이 軸索終端에는 化學的 物質을 많이 포함하고 있는 시냅스 소포(synaptic vesicles)가 있어 軸索終단에 전달되는 디지털 임펄스로 인하여 시냅스 소포로부터 化學的 傳達物質을 분비시키게 되며 이것에 의하여 情報가 전달된다.

III. 神經細胞의 모델化

본 研究에서 시도한 神經모델의 블럭선도는 그림 2과 같으며 神經細胞의 生理的 特性變數와 관련되는 活動電位, 문턱電位, 興奮性 및 抑制性 電位(excitatory and inhibitory potential), 시간지연(time delay), 불응기(refractory period) 및 發火周波數(firing freq-

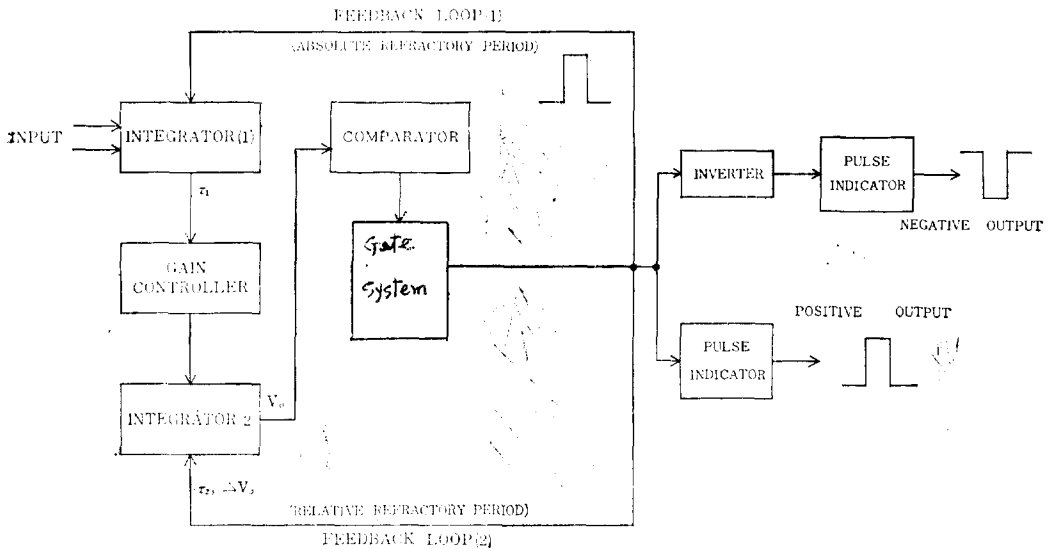


그림 2. 神經細胞모델의 블럭선도
 Fig. 2. Block diagram of electrical neuronal model

uency) 등을 모델의 變數로 하였다.

한편 모델 變數의 設計條件은 神經細胞의 生理的 特性和 같은 수준으로 하였다. 그러나 活動電位の 경우에서는 측정상의 어려움으로 인하여 실제의 값에 비하여 약 10~15배 정도로 증가시켰다.

표 1은 神經모델의 設計條件을 표시하고 있다.

표 1. 神經모델의 設計條件

Table 1. The design conditions of neuronal model

變數	設計條件		生體의條件
活動電位	펄스의 폭	1.0~100 [msec]	0~100 [msec]
	펄스의 크기	0.2~2.2[V]	90[mV]
문턱電位	活動電位에 따라 變動		15~20[mV]
時間遲延	0.1~1.0[msec]		0~0.5 [msec]
發火周波數	1.8~1000[pulses/sec]		
不應期	절대불응기	0~1.0[msec]	0.4~1.0 [msec]
	상대불응기	0~2.7[msec]	1.0~3.0 [msec]

그림 3은 設計條件에 의하여 構成된 神經細胞의 電氣回路이다.

한편 神經모델의 전체적인 動作原理는 다음과 같다. 모델의 입력단인 積分회路和 加算회路의 적당한 입력 채널을 통하여 펄스 자극이 加해지면 op.#1에서 첫번째 積分이 일어난다. 이 積分波型은 利得 調整用的 op.#2의 입력으로 들어가며 여기서 積分波型의 振幅이 調整된 후 다시 積分회路인 op.#3의 입력으로 들어가게 된다. op.#3의 機能은 本 研究에서 시도한 문턱전위 設定의 새로운 방법으로서 刺戟펄스를 重復積分하여 $t \rightarrow \infty$ 에서 얻어진 指數函數曲線을 문턱전위로 應用하기 위하여 사용하였다.

이와 같이 문턱전위로 어떤 일정한 값을 設定하지 않고 입력 자극에 의하여 결정되게 한 것은 神經모델 회로 자체나 측정 시스템에서 發生할지도 모르는 잡음에 의한 영향을 最少로 하기 위해서이다. 이렇게 하여 얻어진 op.#3의 문턱전위는 積分회路 op.#1의 출력과 함께 比較회路(comparator)의 입력으로 들어간다. 여기서 op.#1의 積分波型이 op.#3의 문턱 전위보다 커질 때마다 比較회路의 출력이 나오게 되는데 이것을 視覺的으로 檢知하기 위하여 比較회路의 출력단에 檢知램프(LED lamp)를 使用하였다. 그리고 比較회路의 출력은 다시 게이트회로의 입력으로 들어가게 되는데, 이때 게이트회로에서는 2개의 동일한 극성과 크기의 출

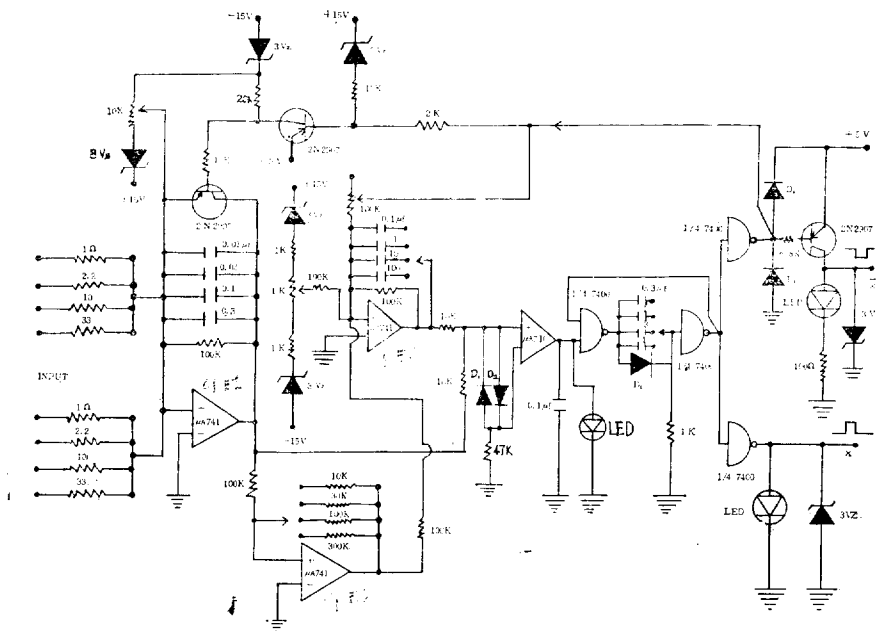


그림 3. 神經細胞의 電氣 모델 회로圖 Fig. 3. Basic circuit of the electrical neuronal model

력이 발생되는데 이중 하나는 positive 펄스로 신경모델의 흥분성 출력으로 사용하게 되며, 다른 하나는 변환기(inverter)를 사용하여 negative 펄스로 바뀌어 신경모델의 억제성 출력으로 작용할 수 있게 하였다.

한편 게이트의 출력단에서 트랜지스터 T_2 및 T_1 으로의 귀환 루우프를 構成하였는데 이것은 게이트회로의 출력이 나오면 이 귀환 루우프의 작용에 의하여 출력펄스가 지속되는 동안에는 절대로 積分回路 op.#1에서 새로운 펄스의 積分이 일어나지 않게 하기 위하여 사용하였다. 즉 트랜지스터 T_1 은 회로상에서 積分器 op.#1의 R,C로 이루어지는 積分 스위치로 작용하고 있기 때문이다. 이것은 神經細胞에서 絕對不應期(absolute refractory period) 특성에 해당되는 것으로 본 研究에서의 絕對不應期는 입력자극의 변화에 따라 항상 상대적인 값을 갖도록 되어 있기 때문에 어떤 일정한 값으로 결정되지 않는다. 한편 문턱전위결정회로인 op.#3의 積分 時定數 C의 값을 선택함으로써 문턱전위의 레벨을 調整할 수 있게 하였는데 이것은 神經細胞의 相對的 不應期(relative refractory period) 특성을 고려한 것이다.

이상과 같은 動作특성을 갖는 神經모델을 製作하여 모델에 加하는 자극의 빈도수(frequency of stimulus), 자극의 지속시간(duration of stimulus) 및 자극의 크기(amplitude of stimulus) 변화에 대한 應答특성을 測定하였다.

IV. 實驗 및 結果

神經모델에 대한 입력자극의 빈도수, 자극의 지속시간 및 자극의 크기 변화에 대한 應答특성은 아래와 같다.

편의상 자극의 빈도수를 F , 입출력 자극의 지속시간을 각각 D_1 및 D_2 , 입출력자극의 크기를 각각 A_1 및 A_2 , 출력전압의 발생 빈도수를 N , 신경모델의 시간지연을 TD , 오실로스코우프의 스위프 타임을 ST 로 나타냈다.

4-1. 刺戟의 頻度數 變化에 대한 應答特性

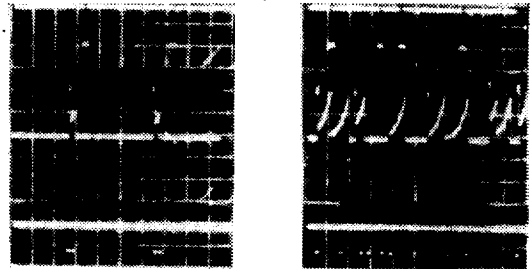
자극의 지속시간과 크기를 일정한 값으로 놓고 刺戟의 頻度數를 增加시키면 표 2와 그림 4에 얻어진 바와 같이 신경모델의 活動電位の 크기는 일정하나 그의 發生頻度數는 增加함을 보여주고 있다.

그림 4의 (a),(b),(c),(d)는 입력자극의 지속시간을 6[ms], 자극의 크기를 0.25[V], 관측 오실로스코우프의 스위프 타임을 100[ms]로 고정하고 刺戟의 頻度數를 각각 4, 40, 90, 400[Hz]로 變化시켰을때의 모델의 입력과 적분 및 출력패턴의 變化를 기록한 것이다.

표 2. 刺戟의 頻度數 變化에 對한 모델變數의 應答特性

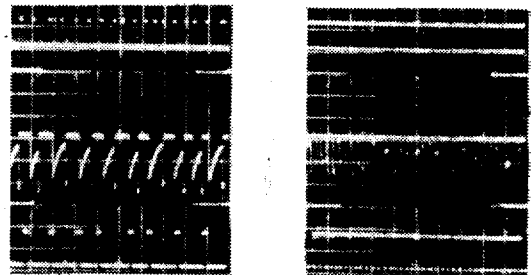
Table 2. Response of the electrical neuronal model to increased frequency of the stimulus

INPUT			OUTPUT				ST [ms]
F [Hz]	D_1 [ms]	A_1 [V]	D_2 [ms]	A_2 [V]	N [N]	TD [ms]	
4	6	0.25	10	2.7	2	3	100
40	6	0.25	10	2.7	4	—	100
90	6	0.25	10	2.7	8	—	100
400	6	0.25	5	2.7	40	—	100



a) $F=4$ $D_1=6$ $A_1=0.25$ $N=2$

b) $F=40$ $D_1=6$ $A_1=0.25$ $N=4$



c) $F=90$ $D_1=6$ $A_1=0.25$ $N=8$

d) $F=400$ $D_1=6$ $A_1=0.25$ $N=40$

그림 4. 刺戟의 頻度數, 變化에 對한 神經모델의 入力 펄스 패턴

Fig. 4. Impulse patterns in the electrical neuronal model for stimulus of different frequency

4-2. 刺戟의 지속시간 變化에 對한 應答特性

刺戟의 頻度數와 크기를 일정한 값으로 고정하고 刺戟의 지속시간을 變化시키면서 神經모델의 活動電位와 그의 發生頻度數를 측정하였는데 표 3과 그림 5에 보인바와 같이 刺戟의 지속시간이 增加하면 活動電位의 크기는 일정하지만 그의 發生頻度數는 增加하였다.

그림 5의 (a), (b)는 刺戟의 頻度數를 40[Hz], 刺戟의 크기를 0.22[V], 오실로스코우프의 스위프 타임

표 3. 刺戟의 지속시간 變化에 對한 모델變數의 應答特性

Table 3. Response of the electrical neuronal model to increased durations of the stimulus

INPUT			OUTPUT				
F [Hz]	D ₁ [ms]	A ₁ [V]	D ₂ [ms]	A ₂ [V]	N [N]	TD [m]	ST [ms]
40	60	0.22	20	2.4	22	3	100
40	600	0.22	100	2.4	37	—	100
30	8.5	0.22	24	3.0	3	3	20
30	15	0.22	20	3.0	6	—	20

4-3. 刺戟의 크기 變化에 對한 應答特性

刺戟의 頻度數와 지속시간을 일정한 값으로 고정하고 자극의 크기를 變化시키면서 신경모델의 活動電位와 그의 發生頻度數를 측정하였는데 표 4와 그림 6에 보인바와 같이 자극의 크기가 增加하면 活動電位의 크기는 일정하지만 그의 發生頻度數는 增加하였고 자극의 크기가 문턱電位보다 낮으면 活動電位는 일어나지 않는다.

표 4. 刺戟의 크기 變化에 對한 신경모델의 應答特性

Table 4. Response of the electrical neuronal model to increased amplitude of the stimulus

INPUT			OUTPUT				
F [Hz]	D ₁ [ms]	A ₁ [V]	D ₂ [ms]	A ₂ [V]	N [N]	TD [ms]	ST [ms]
40	6	0.16	0	0	2	3	100
40	6	0.2	20	2.4	2	—	100
40	6	0.4	20	2.4	10	—	100
40	6	0.56	15	2.4	13	—	100

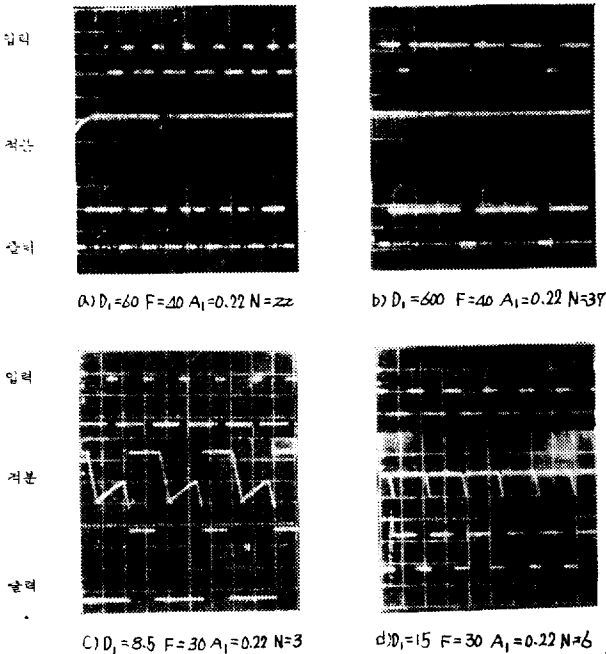


그림 5. 刺戟의 지속시간 變化에 對한 신경모델의 임펄스 패턴

Fig. 5. Impulse patterns in the electrical neuronal model for stimulus of different duration

을 100[ms]로 고정하고, 刺戟의 지속시간을 각각 60, 600[ms]로 하였으며, (c), (d)는 刺戟의 頻度數를 3[Hz], 刺戟의 크기를 0.22[V], 오실로스코프의 스위프 타임을 20[ms]로 고정한 후 刺戟의 지속시간을 8.5, 15, 23[ms]로 增加시켰을 때의 신경모델의 임펄스 패턴의 變化를 기록한 것이다.

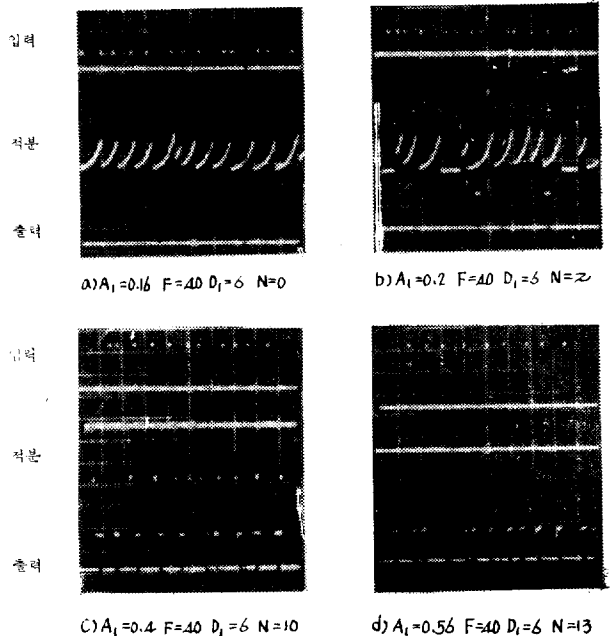


그림 6. 刺戟의 크기 變化에 對한 신경모델의 임펄스 패턴

Fig. 6. Impulse patterns in the electrical neuronal model for stimulus of different amplitude

그림 6의 (a), (b), (c), (d)는 입력자극의 빈도수를 40[Hz], 자극의 지속시간을 6[ms], 오실로스코프의 스위프타임을 100[ms]로 고정하고 자극의 크기를 0.16, 0.2, 0.4 및 0.56[V]로 증가시켰을 때의 신경모델의 임펄스퍼텐이며 특히 입력자극의 크기가 0.16[V]일 때에는 신경모델의 활동電位는 發生되지 않았다.

V. 結論

本 研究는 神經系에서 이루어지고 있는 情報處理 메카니즘의 일부를 電氣의 모델化 방법에 의하여 밝혀 본 것으로 그 얻어진 結果를 要約하면 다음과 같다.

(1) 神經모델에서 刺戟의 지속시간과 크기가 일정할 때 刺戟의 頻度數가 增加하면 活動電位의 크기는 일정하지만 그의 發生頻度數는 增加하였는데 이것은 神經細胞에서 刺戟의 크기나 지속시간이 增加하면 시냅스 소포에서 아세틸콜등의 化學的 傳達物質의 분비량이 增加하여 活動電位의 發生을 촉진시키는 生理的 特性을 만족하고 있었다.

(2) 神經모델에서 刺戟의 頻度數와 크기가 일정할 때 刺戟의 지속시간이 增加하면 活動電位의 크기는 일정하지만 그의 發生頻度數는 增加하였는데 이것은 神經細胞에서 "strength-duration" 관계의 生理的 特性을 만족하고 있었다.

(3) 神經모델에서 刺戟의 頻度數와 지속시간이 일정할 때 刺戟의 크기가 增加하면 活動電位의 크기는 일정하지만 그의 發生頻度數는 增加하였고 자극의 크기가 문턱電位보다 낮으면 刺戟의 頻度數나 지속시간의 增加에 관계없이 活動電位는 發生되지 않았는데 이것은 神經細胞에서의 "all or nothing" 법칙을 만족하고 있었다.

이상의 實驗結果로 미루어보아 神經細胞와 神經回路網으로 構成되는 神經系의 情報處理 메카니즘은 임펄스자극의 加重現象과 活動電位의 發生樣詳에 밀접한 관계가 있음을 시사하고 있다.

따라서 本 實驗에서 사용된 神經모델을 좀더 改善하고 또한 神經모델에 필요한 電源의 單一化, 刺戟의 正確한 선택, 모델變數의 單一化등을 좀더 改善, 확장할 수 있다면 복잡한 神經回路網을 간단한 論理制御要素로 볼 수 있기 때문에 최근 널리 이용되고 있는 마이 크로프로세서등으로 간단한 目的의 情報處理用 論理制御시스템을 實現할 수 있을 것이며 이들을 모델의 基本要素로 하는 새로운 系統모델을 設計하여 컴퓨터 시뮬레이션이 가능해지리라 생각된다.

나아가서는 실제 臨床에서 일어나는 여러가지 불가사의한 生命現象을 규명하여 人間-機械系의 보다 유

사한 접근을 기대할 수 있을 것으로 생각한다.

謝意

本 研究는 峨山社會福祉事業財團의 1978年度 研究開發費의 支援으로 이루어진 것으로 深甚한 謝意를 表하는 바이다.

參 考 文 獻

- 1) Deutsch, J.A. & Deutsch, D.,; *Physiological Psychology*, The Dorsey Press, Homewood, Illinois, 1973.
- 2) 박상희, 이명호, "신경세포의 전기적 모델화에 관한 연구", *대한전기학회지*, Vol. 24, No. 6, pp. 97~101, 1975.
- 3) Mountcastle, V.B.,; *Medical Physiology*, Teh C.V. Mosby Company, Vol. 11, p. 1285, 1968.
- 4) Ganong, W.F.,; *Review of Medical Physiology*, Lange Medical Publications, Science Publications Center, pp. 18~31, 1975.
- 5) Caianiello, E.R., "Neural Nets and Natural Languages," Presented at the Japan Industrial Association Symposium on Information Processing Systems-Tokyo, March, 1972.
- 6) Brabi, M. & Carelli, V., "The Self-inhibited Leaky Integrator: Transfer Functions and Steady State Relations," *Biol. Cybernetics*, Vol. 20, pp. 51~59, 1975.
- 7) Parker, P.A. & Stuller, J.A., "Signal Processing for the Multistate Myoelectric Channel," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 65, No. 5, pp. 12~19, 1977.
- 8) Caianiello, E.R., "New Concepts and Technologies in Parallel Information Processing," *Nato Advanced Study Institutes Series*, Vol. 9, pp. 265~276, 1975.
- 9) Leung, K.V. & Mangeron, D., "On the Stability and Numerical Solutions of Two Neural Models," *Utilitas Math.* Vol. 5, pp. 167~212, 1974.
- 10) Yagi, H.,; *Introduction to Neuron Physiology for Engineer*, Electric Book Publishing Company, Tokyo, 1974.
- 11) Eccles, J.C., "The Cerebellum as a neuronal machine," *Berlin-Heidelberg-New York: Springer*, 1967.