

# 神經의 電氣的 모델 化

● 技術資料

박 상 희\* 이 명 호\*\*

- 차 례 -

- 1. 序 論
- 2. 神經 모델化의 歷史的 背景 및 現況
- 3. 結 論

## 1. 序 論

인체의 모든 생리적 작용을 지배하는 신경계의 생리적 기능을 전기적 모델을 통하여 재현시켜보는 것은 매우 유익한 일이다. 본 장에서는 신경의 전기적 모델화의 역사적 배경과 발달 현황 및 장래의 개발 전망에 관하여 살펴 보기로 한다. 신경모델은 신경자체의 기원과 구조상에서는 상당히 큰 차이가 있으나 신경의 기능면에 있어서는 비슷한 아나로그 모델을 말하는 것으로, 인체에 대한 각 기관의 전기적 모델화의 발달은 신경생리학의 실험적 완성일 뿐만 아니라 그 결과에 대한 측정 및 분석을 통하여 인체 일부에 관한 기능적 인공모델을 실현시켜 임상에 많은 기여를 할 수 있다는 점에서 오늘날 전기공학의 새로운 응용분야로 각광을 받고 있는 것이다. 신경생리의 어떤 경우에 대해서는 현재의 임상기술로는 해결할 수 없는 불가사의한 점들이 많이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 전기적 모델을 구성하여 여러 측면에서 가해 보는 실험적 분석은 좋은 해결점을 제시하여 줄 수 있는 것이다. 이들 신경의 아나로그모델은 간단한 약식 모델에서부터 물리나 수학적으로 매우 정교한 모델에 이르기까지 그 형태는 매우 다양하다.

과거 반 세기 동안의 대부분의 신경모델은 전기·화학적 지식, 전기회로, 수학 공식의 이용 및 디지털 전자계산기를 이용한 시뮬레이션 형태로 발전되고 있다.

여기서 수학적 모델이라든가 전기 및 전자계산기를 이용한 시뮬레이션 모델은 대부분 비슷한 아나로그로 구성되기 때문에 서로 상관적인 이점과 단점을 가지고 있다고 볼 수 있다.

수학적 모델은 제한된 범위에서는 많은 변수가 합리적으로 결합되지만 한다면 매우 귀중한 모델이 될 수 있으며 비선형성도 분석상의 어려움이 그렇게 심하지는 않다. 특히 세포막에 대한 생물학적인 분석에 많이 응용되고 있다. 최근에 와서는 완벽한 전기회로 구성

의 예비과정으로 수학적 모델을 이용하고 있다. 신경구조 전체에 대한 조화적 통계처리와 파형의 모양, 파형의 전파현상과 같은 대규모 전기적 동작 특성을 분석하는데 적합한 모델이다.

전기모델은 연속 변수의 비선형적 동작특성을 정확하고 그리고 경제적으로 시뮬레이션 할 수 있다. 실험조건이 조작되는 동안 관찰되는 Real-time Signals을 공급할 수 있다면, 이들 모델은 다른 모델에서는 얻기 힘든 일종의 빠르고 효과적인 observer-model 상호작용을 가능케 할 수 있을 것이다. 이 때 전자모델에 가하여지는 자극과 모델의 변수가 변하는 동안 파형이나 위상관계, 변조 및 시간의 종속적 상호작용에 관한 직접적인 관찰을 할 수 있는 이점이 있다.

이러한 이점은 한개 혹은 두 서너개의 상호연결된 단일 신경세포의 모델화에 매우 효과적이다.

한편 아나로그 전자계산기는 전자모델의 이점과 비슷하나 속도가 매우 느리고 좀 까다로운 점들이 있다. 디지털 전자계산기는 계산속도와 기억능력이 매우 빠르고 엄청나기 때문에 융통성이 있고 여러가지 복잡스러운 문제점들의 처리가 선행되어야 하는 신경의 모델화 수행에는 매우 적합하다고 볼 수 있다. 그러므로 대회로망 시뮬레이션에서 일어나는 문제점들은 다른 어떤 기술로보다는 디지털 전자계산기에 의하면 훨씬 쉽게 해결될 수 있다.

이들 전자계산기를 이용한 시뮬레이션의 뛰어난 이점은 discrete symbols의 사용으로 지정된 변수의 완벽한 제어와 관찰을 해낼 수 있다는 점이다.

## 2. 神經 모델化의 歷史的 背景 및 現況

신경계통에 대한 최초의 모델은 천동설이 주장되던 틀레미시대에 신경과 근육간의 상호작용에 대한 연구로부터 비롯된다. 그 후 수백년 동안은 신경이 흥분상태로 되는 원인과 근육의 수축운동은 규명하지 못한 채 하나의 같은 사실로만 간주되어 왔다. 그래서 초기의 신경모델은 신경과 근육간의 상관적 모델이었다. 한편 17세기에 들어와서는 근육의 수축현상은 근육체

\* 정회원 : 연세대학교수(工博)

\*\* 정회원 : 연세대학교 대학원 전기공학과

적의 증가나 혹은 부풀어 오르는 결과때문이라고 생각되었다.

이러한 주장의 공통점은, 근육은 길고 팽창성이 있는 튜브모양으로 액체나 가스가 파이르처럼 생긴 신경을 통하여 근육으로 흘러들어 간다고 생각하였다. 이런 주장은 17세기 Descartes의 이론으로 절정에 이르게 되었다.

### 2.1 Descartes (1662)의 모델

Descartes는 당시 수압자동장치에 사용된 수도파이프와 동물의 신경을 비교 검토하였다. 이 결과는 그로 하여금 수압자동장치의 원리는 신경의 도전현상과 근육의 수축현상에 대한 그의 이론을 입증하여 주고 있다는 사실을 알게 하였다.

그의 이론 중에는 불수의 반사운동과 근육의 상반적 신경지배 운동에 관한 최초의 이론이기도 하였다. 그에 의하면 모든 하등동물은 간단한 자동장치에 불과하다고 보았다. 그러나 사람은 합리적이고 이지적인 요소인 정신(spirit)을 뇌의 송과선(pineal gland)에 위치한다고 믿었다.

이 정신은 부드러운 액체나 혹은 순수하고 신선한 광채 같은 것이라고 생각했다. 이들 정신은 심장에서 계속적으로 발생되어 뇌의 빈 곳으로 올라가며 뇌의 빈 곳은 이들의 저장소가 된다고 믿었다. 뇌에 들어온 정신은 텅빈 신경을 통과하여 근육에 이르게 되는데 이때 근육에 도달되는 정신의 양에 의하여 근육의 이완과 수축운동이 일어난다고 보았다. 신경에서 동물의 정신의 흐름은 각 신경의 정점에 위치되어 있는 발브(valve)에 의하여 제어된다고 생각했다. 이 발브는 직접적으로는 송과선의 제어하에 놓이거나 혹은 서로 다른 신경에서의 정신의 흐름과 압력차에 의하여 간접적으로 조정된다고 하였으며, 근육이 정신으로 가득 채워지면 근육의 중앙부분은 부풀어 오르고 끝부분은 수축한다고 주장했다. 반면에 근육의 중앙부분이 비어 있을 때에는 근육은 이완운동을 일으킨다고 보았다.

Descartes의 이와 같은 기계론적 견해는 17세기의 많은 과학자들에게 영향을 주었다. 특히 Borelli는 근육의 수축운동과 부풀음사이의 모순성을 파헤쳤고 근육위에 일정한 크기의 무게가 가해진 상태에서 근육의 수축운동에 필요한 힘을 계산해 내기 위한 모델 연구에 많은 공헌을 하였다.

### 2.2 Cavendish (1776)의 모델

Cavendish는 홍어와 전기뱀장어의 전기 쇼크 현상을 연구하였는데, 이 보다 앞서 Lorenzini에 의하면 홍어와 전기뱀장어의 표면에 닿을 때 느껴지는 전기소(電氣素)나 혹은 미립자에 의하여 일어난다고 예견하

었다. 한편 Reaumer는 1714년에 홍어의 전기쇼크 현상은 홍어 근육의 예리한 수축운동 때문이라고 주장하기도 하였다. 즉 홍어를 만지는 사람에게 예민한 기계적 타격이 가해지는 결과라고 하였다. 1772년경 몇몇 과학자들은 홍어의 전기쇼크 현상은 완전히 전기 현상에 의한 것이라고 결론짓게 되었는데, 특히 Walsh는 전기쇼크가 전기도체를 통할 때는 도전현상까지 일어난다는 사실을 밝혀냈다. 이러한 이론적 근거에 힘입어 Cavendish는 인공전기뱀장어를 만들었는데, 이것이 인류 최초의 생리학적인 특성이 전기적 모델로 치환될 수 있다는 가능성을 보여 준 것이라고 볼 수 있다.

인공전기뱀장어의 모델은 긴 손잡이가 있는 전기뱀장어의 모양의 얇은 나무판에 백열판이 모델의 꼭대기와 밑바닥에 부착되었다. 이들 백열판에서 손잡이 끝까지는 철사를 남으로 썬워 절연시켰다.

전체 모델은 양가죽으로 싸웠으며, 나무의 전도도를 높이기 위하여 며칠동안 소금물에 담가 두었다. 그후 조그마한 소금물 통속에 인공전기뱀장어를 담근 후 한쪽 손을 백열판위에 놓았다. 다시 접촉되어 있는 전선을 충전된 라이덴병의 바테리에 연결시키고 각 라이덴병의 충전상태를 변화시키면서 실험을 하였다. 그 결과 소량의 강력한 충전 라이덴병에서 보다는 많은 수의 비교적 약한 충전 라이덴병으로부터 더 큰 전기쇼크를 받게 된다는 사실을 발견하게 되었다.

만일 그가 충분한 수의 충전 라이덴병을 사용했다라면 비록 전기쇼크의 힘이 모네펠로네의 조그만 간격을 뛰어 넘을 수는 없어도 실제 전기뱀장어의 전기쇼크 정도와는 비슷했을 것이다.

반면에 방전현상은 너무나 순간적으로 일어났기 때문에 당시의 전기미터로는 측정이 불가능했다.

### 2.3 Du Bois-Reymond (1852)의 모델

1840년~1850년 사이에 Du Bois-Reymond는 대단히 예민한 특성의 Galvanometer를 만들어 신경과 근육운동에서 야기되는 전류를 측정하였다. 그는 실제의 신경과 근육뿐만 아니라 이들의 전기·화학적 아나로그 모델을 통해서도 계속적인 실험을 해나갔다. 그는 특히 그의 이런 모델을 사용하여 동물의 전기쇼크 현상에 대한 그 자신의 가정을 시험하였다.

Du Bois-Reymond는 근육의 경도면(longitudinal sections)과 횡단면(transverse sections) 사이의 전기적인 반대현상이 있음을 관찰하였다 그에 의하면 어떤 손상되지 않은 완전한 근육은 그의 경도면과 횡단면 사이에 굉장히 큰 안정전압(resting potentials)이 존재한다고 주장했다.

그는 보다 정밀한 측정을 통하여 아무리 작은 근육

의 단면내에서 일지라도 반드시 전위차가 있다고 보았는데, 이 사실을 입증하기 위하여 그는 solid copper cylinder와 아연으로 입혀진 cylindrical surface 및 아연극 사이의 전위분포상태를 모델화 시키려고 하였다.

젖은 전해질 도전체의 한쪽 끝을 아연에 부착시키고 다른 한쪽 끝을 구리에 부착시킨다면, 아연과 구리 사이에는 전류의 흐름이 발생된다. 이 실험의 결과를 바탕으로 하여 Du Bois-Reymond는 “peripolar molecular model”을 고안하였다. 이 새로운 모델은 측면에 가느다란 아연선으로 입혀진 작고 텅빈 72개의 cylinders로 구성되었다. 각 cylinder의 안쪽은 유약으로 절연시키고 모든 cylinder는 같은 방향에서 나오는 아연선으로 된 상자속에 균등하게 자리잡게 된다. 상자는 전해질 용액으로 채워지며 이 결과로 얻어지는 전류는 플라티늄 전극으로 측정된다.

2-4. Rashevsky(1933)의 모델

1930년경에는 신경활동의 원인을 규명하기 위한 전기적 모델외에 수학적 모델이 등장하였다. 이것은 1933년 Rashevsky에 의하여 제안된 것으로 신경에서의 흥분과정은 두 개의 시간요소에 의하여 완벽하게 설명할 수 있다고 주장하였다. 두 시간요소라는 것은 두 개의 1계 선형 상미분방정식에서의 시정수를 말한다. 두 방정식의 종속변수는 막전압(membrane potentials)과 문턱전압(threshold potential) 혹은 흥분(excitation)과 억제(inhibition)를 말한다. 그러나 1937년 Young에 의하여 Rashevsky와 Hin의 모델은 같다는 것이 입증되었다. 미분방정식의 성공으로 인해 고무된 Rashevsky는 규모가 크고 복잡한 신경계통에 대한 수학적 형태로 확장 해냈다.

2.5 McCulloch (1943)의 모델

대개의 경우 신경의 수학적 모델은 선형미분방정식이 기본을 이루고 있는데 McCulloch와 Pitts에 의하면 오히려 이들 복잡한 과정이 필요한 미분방정식보다는 부울대수(boolean algebra)와 집합이론(set theory)의 응용이 훨씬 바람직하다고 주장하였다.

2.6 Hodgkin-Huxley(1952)의 모델

이 모델은 신경의 흥분전도현상을 정확하게 설명하기 위한 것으로 오징어의 대형축색안쪽에 microelectrodes를 삽입하고 막전압의 단계적인 변화반응에 대한 축색에서의 막전류의 변화를 측정하였다.

그림 1은 신경조직의 전기적 성질을 표현한 등가회로이다. 이 회로에서 측정된 데이터로부터 Hodgkin과 Huxley는 네 개의 동차미분방정식을 유도해 내어 신경세포의 흥분과정을 정확하게 설명하는데 획기적인

발전을 이룰 수 있게 공헌하였다.

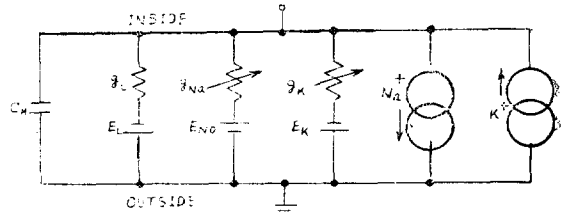


그림 1. The equivalent circuit for a section of membrane cell and the three Hodgkin-Huxley ionic components in parallel

그에 의하면 그림 1에서 볼 수 있는 것처럼 Na, K 들은 자기 다른 통로를 거쳐 전류를 운반하므로 그 통로의 전기 전도도를  $G_{Na}$ ,  $G_K$ 로 했다.  $G_{Ca}$ 은  $N_a$ ,  $K$  이외의 이온들을 통털은 것으로 누설저항에 의하여 생기게 된다.  $G_{Na}$ ,  $G_K$ 는 흥분시에 변화하지만  $G_{Ca}$ 은 변화되지 않는다. 신경 세포막의 전기용량을  $C_m$ 이라고 하고 각 이온의 농도차에 의한 평형전압을 각각  $E_{Na}$ ,  $E_K$ ,  $E_{Cl}$ 로 했다.

흥분시의 막 전류  $I_m$ 은

$$I_m = C_m \cdot \frac{dE_m}{dt} + I_i$$

이 때 우변의 제 1항  $C_m \cdot \frac{dE_m}{dt}$ 는 막 표면에 대한 이온의 이합집산에 기인된 용량성 전류이고 실제로 이온이 막을 통과하기 때문에 생긴 전류는 아니다. 물론 이것은 극히 짧은 시간에 끝나고 만다. 이온 통과에 의한 전류로서 여기서는  $I_i = G_K(E_m - E_K) + G_{Na}(E_m - E_{Na}) + G_{Cl}(E_m - E_{Cl})$ 로 표시된다. 이상에서 살펴본 것처럼 1950년 초기의 Hodgkin-Huxley의 수학적 해석 방법과 1950년 중반기에 급속도로 성장 발전한 디지털 전자계산기의 응용으로 신경모델의 설계문제나 분석 및 처리에 이르기까지 획기적인 진전이 있었다. 따라서 본 고찰에서는 Hodgkin-Huxley 이후의 신경모델을 주로 살폈다.

2.7 Rall(1957)의 모델

신경의 구성요소인 수상돌기(dendrite)에 관한 조직학적인 데이터가 발표된 후 Rall은 전체 신경의 전기적 특성을 규명하는데 있어 수상돌기의 모델화는 매우 바람직하다고 생각했다.

따라서 Rall은 수상돌기의 모델화를 위하여 두 가지의 수학적 개념을 도입하였다. 첫째는 Equivalent-cylinder로서 흥분이 soma에서 발생하여 대칭적 구조의 수상돌기 가지(tree)로 퍼져 들어간다고 가정하는 경우에 사용되었다. 즉 전체 가지의 구조는 그림 2에서 처럼 전기적 특성이 분포되어 있는 수학적으로 매

우 간단한 모델로 될 수가 있다.

이 Equivalent cylinder 모델의 초기 연구 목적은 Eccles의 "Standard motoneurone"의 고찰에 응용하기 위해서였다. Rall은 이것을 더욱 진보 발전시켜 해부학적인 데이터, 막 저항값의 계산, 전체 신경의 전도성 등에 논리적 타당성을 찾았거 했다.

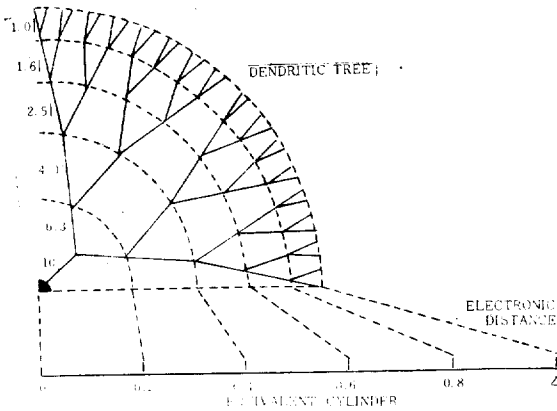


그림 2. A particular symmetric dendritic tree and its equivalent-cylinder representation. "Electrotonic distance" between two points is proportional to the time required for electrotonic conduction between connect points having the same electrotonic distance in both the tree and equivalent cylinder

Rall은 또한 그의 수상돌기 모델을 통하여 막 시정수(membrane time constant)의 계산을 하였다. Eccles와 그밖의 몇몇 사람들은 흥분성 시냅스 활동은 막의 수동적인 재분극(repolarization) 현상에 기인하여 일어나는 탈분극(depolarization)의 능동적 위상변화 때문이라고 보았다.

시냅스 전압에 대한 수동적 감쇄현상으로부터 막 시정수는 고양이와 쥐의 경우에는 motoneuron에서 3~5msec였다.

Rall의 모델은 수상돌기 가지로 퍼져들어가는 전기 긴장도는 새로 일어나는 순간적인 과도현상을 설명할 수 있으며 막 시정수는 무시되어서는 안된다는 결론에 도달하였다.

한편 관찰된 시냅스 전압과 순간적인 과도현상 사이의 타당성은 수상돌기 가지의 전기적 특성이 고려되는 한 시냅스전류의 늘어난 active phase에 관계없다고 보았다. 그리고 해부학적인 데이터와 soma potential의 과도적 반응 사이의 타당성이 입증되었다. 수상돌기 가지의 비대칭성 가지나 혹은 비대칭성의 외란은

일련의 discrete elements에 의하여 표현되어지며 각 elements나 혹은 compartments는 가지의 범위를 나타내 준다.

Rall의 모델을 적용하는데는 compartmental system analysis의 수학적 개념이 이용된다. 원칙적으로 이 compartmental 모델은 어떤 특수하게 제한규정된 수상돌기의 가지를 다루는데 이용될 수 있다.

Rall의 compartment 모델은 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 수상돌기 가지의 여러 부분에서 발생하는 시냅스 전압의 시·공간적 함이 어떻게 가중되는가를 규명하기 위하여 구성되었다.

그는 수상돌기 가지의 여러 위치에서 흥분성 시냅스의 입력으로 인하여 얻어지는 soma-membrane depolarization은 soma에 가까이 있는 시냅스의 효과와 soma로부터 멀리 떨어져 있는 시냅스의 효과 사이에는 큰 차이가 있음이 밝혀졌다.

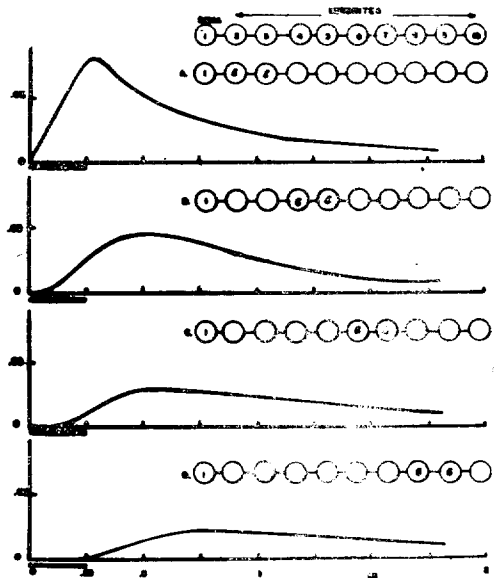


그림 3. A sample of results from Rall's compartmental model: time courses of Soma potentials in response to excitatory stimuli at various positions on the dendritic tree. Circles (2-10) are compartments representing regions of the dendritic tree. The ascending numerical order of the compartments indicates increasing electrotonic distance from soma. The script E shows the location of the stimulus in each case; the heavy line along the time axis shows stimulus duration

2.8 Lewis(1965)의 모델.

Lewis는 somatic region과 dendritic region에서 발견된 subthreshold effects는 suprathreshold 현상을 설명하는데 사용된 것과 같은 이온설로 설명할 수 있어야 한다고 예견하였다. 이 예상은 dendritic membrane과 somatic membrane이 axon membrane과 연결되기 때문에 이들의 기본적 전기특성이 비슷해야 하는 가정이 필요하다고 주장했다. 이러한 그의 주장을 입증하기 위하여 오징어의 축색에서 일어나는 이온전류를 시뮬레이션 시키기 위한 전기 아나로그 모델 개발에 공헌하였다.

2.9 Perkel (1964)의 모델

Moore와 Segundo에 의하면 모든 신경세포는 흥분의 전도시 항상 억제성 시냅스와 흥분성 시냅스의 두 결합으로 된다고 주장했다.

억제성 시냅스전압이 수용성 세포의 본래의 간격을 확장시키려는 성질이 있으며 흥분성 시냅스 전압은 수용성 세포의 간격을 짧아지게 하려는 성질이 있다. 어떤 경우에는 수용성 세포가 그의 spike potential의 간격을 억제성 전압과 흥분성 전압이 1대 1로 대응되기도 한다.

이러한 특성을 바탕으로 하여 Moore는 신경세포의 억제성 결합으로 인한 상호작용을 관찰하였고, 그 후 Perkel은 이들 신경세포간의 상호작용을 디지털 전자계산기 시뮬레이션 방법으로 연구하였다.

특히 그의 모델은 매우 간단한 minimum-parameter 모델로 당시에 많이 개발되었던 다른 어떤 디지털 전자계산기 시뮬레이션에서도 찾아볼 수 없었던 많은 이점을 제시하여 주고 있다.

그의 모델에서 시간은 변수로 간주하였다. 일단 spike 전압이 발생되면 모델의 반응은 exponentially하게 감쇠된 절대불응기를 가지며 막 전압은 다시 평형상태로 회복된다. 만일 문턱전압이 평형전압 이하가 되면 신경 세포는 평형상태로 회복되기 위하여 다시 발화현상이 일어나게 되며, 문턱전압이 평형전압 이상이 되면 신경세포는 평형상태에 도달된다. 그리고 안정상태로 머물게 되는 것이다.

각 시냅스 입력에 대하여 발생하는 전압은 순간적으로 막 전압에 가중된다. 즉 막 전압은 이 새로운 값으로부터 spike 전압으로부터 회복시간과 꼭 같은 비율을 갖는 평형상태로 회복된다.

이렇게 가중된 전압은 흥분성 시냅스전압에 대해서는 positive의 특성을 가지며 억제성 시냅스전압에 대해서는 negative 특성을 갖는다.

Perkel은 신경세포의 자발적 활동을 시뮬레이션 시

키기 위하여 모델변수를 조정하였다. 그는 평형전압을 문턱전압이하로 고정시키면서 유도해 나갔다. 그는 그의 모델에 신경세포의 본래의 간격보다 약간 긴 간격을 갖는 주기적 억제시냅스 전압을 가함으로써 Aplysia에 대한 생리학적인 데이터와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 즉 신경세포의 spike 전압은 억제성 시냅스 전압과 1대 1의 비율로 발생되었다.

그림 4는 억제성 입력 주파수의 기능으로서 신경세포의 평균 발화주파수 사이의 관계를 나타내준다. 이 그림에 나타난 곡선은 Perkel이 crayfish stretch receptor에 대한 보충 연구를 통하여 Aplysia의 특성에 훨씬 가까운 데이터를 얻을 수 있게 했다.

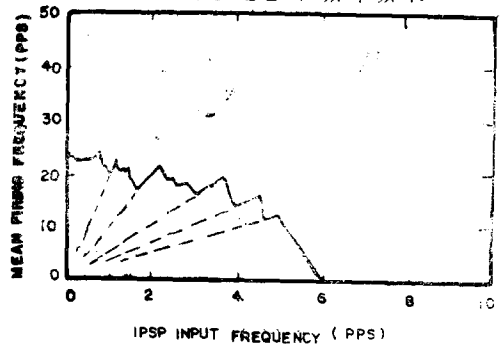


그림 4. Data from simulated inhibitory firing of a neuron. Dashed lines are drawn from the origin to segments of the data showing stable interaction between spikes and incoming Isp's

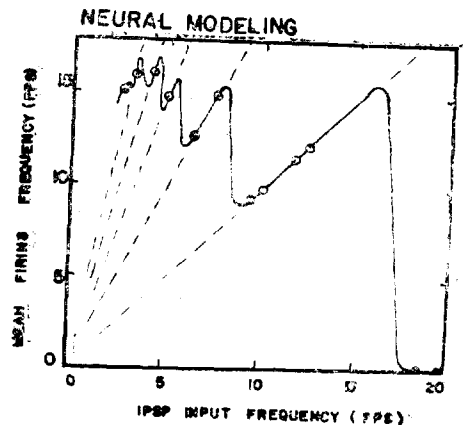


그림 5. Data showing inhibitory driving of a crayfish stretch receptor. Two regions of stability were inferred from single points of data. Data on right exhibit wide segments over which increased inhibitory input results in increased output spike frequency as predicted by Perkel's Model

**2.10 Crane(1962)의 모델**

Crane은 신경의 축색에 대한 아나로그 모델에 관하여 연구 하였다.

그는 모델의 요소로 Neuristor를 사용하였는데 이것은 일차원적 channel로 방전형태의 신호를 전파시키는 간단한 장치로 1) 자극의 문턱수준, 2) 무감쇠 전파 3) 균일한 전파속도, 4) 임의의 위치에서의 절대 불응기등에 관한 결정에 적합한 것이었다. Neuristor는 기능적인 면에서 오히려 생리학적인 서술로 특성지어진다고 볼 수 있다.

한편 Neuristor를 정의하는에는 2가지의 집합방법으로 설명되는데 trigger mechanism을 통하여 이루어지는 흥분성 결합인 T-junction과 inactivation이나 혹은 refractory mechanism을 통하여 이루어지는 억제성 결합의 R-junction이다. 그에 의하면 모든 신경집단의 논리적 기능이 T-junction과 R-junction의 결합으로 유도된다고 결론 지었다.

그의 모델을 이용하여 다음과 같은 매우 흥미있는 흥분성 시냅스 전압의 전송현상을 관찰할 수 있었다.

즉 2개의 pulse가 동일한 neuristor line에서 trailing 한다면 다음과 같은 반응이 일어난다고 생각했다.

1) trailing pulse는 leading pulse에 의하여 separation의 크기에 관계없이 반발된다. 이것은 첫번째 pulse의 발생후의 불응상태로부터의 단조로운 회복현상때문이다.

2) pulse-locking phenomena

3) structural discontinuities으로 인한 pulse의 연합현상

이상의 관찰을 통하여 그는 여러가지 신경현상이 어떻게 neuristor line과 시뮬레이션이 될 수 있는 가를 보여 주었다.

특히 그는 유사성이 존재하고 있음을 보여주기 위하여 여러가지의 neuristor와 Hodgkin-Huxley 모델을 비교하였다.

**2.10 Harmon (1961~1964)의 모델**

Harmon(1961)은 neuromime의 임출력특성은 주파수 변화와 흥분성 자극의 크기와의 관계를 규명하는데 많은 도움을 주고 있다고 말했다.

물론 주파수의 분배현상은 흥분성 자극펄스의 크기를 감소시킨다는 사실도 확인할 수 있었다. 이러한 경우에 매번의 자극 펄스는 반응되는 spike 전압을 시냅스의 막 전압의 temporal summation으로 인한 현상때문에 문턱전압 수준을 초과하기에는 불충분했다.

이러한 작용에 대한 임출력 주파수 비(ratio)는 temporal summation의 범위밖으로 되기 때문에, 이 점

을 개선하기 위해서는 주파수가 일정해야 하고 크기가 점차적으로 감소되는 펄스로 neuromime을 자극하여야만 된다.

이 결과 보통의 임출력 주파수 비는 정수비이지만 Harmon의 모델에서는 비정수 비로 관찰되었다.

신경계에 대한 모델화 시도도 고무된 신경생리학의 연구는 전에는 알려지지 않았던 비정수 비가 신경의 생리적 특성에 상당한 영향을 주고 있음을 입증하기에 이르렀다.

한편 Harmon(1963)은 보다 직접적으로 신경생리학적 증명에 관련되는 Choclearnucleus의 작용에 근거한 전기 아나로그 모델을 고안하였다. 그림 6-(a)는 자기억제성 특성에 대한 모델의 개요이다.

한편 그림 6-(b)는 이의 기본적 동작을 묘사한 것이다.

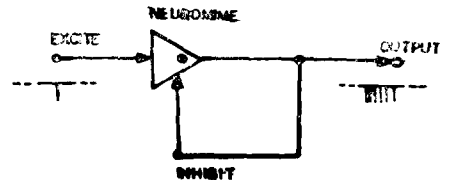


그림 6-a. Configuration of neuromime with self-inhibition. Output burst is used to provide quenching inhibitory feedback

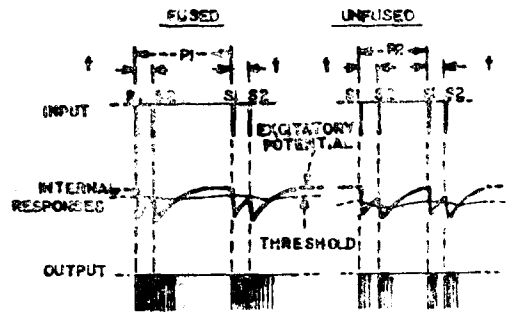


그림 6-(b) Schematically represented action of self-inhibiting neural model to obtain burst-length variation as a function of pulse-pair repetition rate

및 그림6-(b)에서

**1) In the Fused Case**

최초의 자극펄스 S<sub>1</sub>의 반응에 의하여 증가된 흥분성 전압은 두번째 자극펄스 S<sub>2</sub>의 도달이 있기까지는 계속적으로 감소된다. 반면에 흥분성 전압이 문턱전압수준을 넘으면 출력이 출현한다.

문턱전압 수준은 출력이 계속되는 동안 self-inhibit-

on 특성 때문에 변하게 된다.

즉 흥분성 전압을 넘을 때까지는 계속적으로 증가하게 된다. 그런 후에 흥분성 전압의 발화가 중단되면, 문턱전압 수준은 다음 번 자극펄스가 도달하는 시간동안 서서히 안정전압으로 감소된다. 흥분성 전압이 펄스사이의 전 간격이상으로 문턱전압 이상으로 증가하기 때문에 S<sub>1</sub>과 S<sub>2</sub>로 인하여 발생하는 출력은 손쉽게 얻을 수가 있는 것이다.

2) In the Unfused Case

펄스 간격  $\delta t$ 는 일정하며 pulse-pair repetition rate는 1)의 경우보다 훨씬 높은 것으로 나타났다(그림 6-(b)에서  $P_2 < P_1$ )

한편 Harmon(1964)은 그림 7에서 볼 수 있는 것처럼 근육의 상반적 신경제어기능에 관한 McDougnall(1903)의 이론을 바탕으로 하여 Reiss(1962)와 함께 공동으로 디지털 전자계산기 시뮬레이션과 전자 아나로그 모델을 사용하여 두 신경사이의 상호작용을 나타낼 수 있는 모델연구에 집착했다.

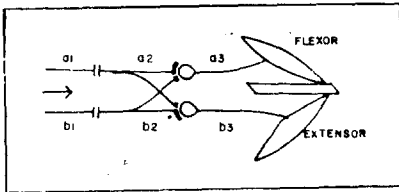


그림 7. Reciprocal inhibition for control of antagonistic muscles. a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>: afferent neurons. Resistance of synapse a<sub>2</sub>-a<sub>3</sub> is low, excitation passes from efferent a<sub>1</sub> through central neuron a<sub>2</sub> to efferent a<sub>3</sub> and onto the flexor.

The low resistance of the synapse a<sub>2</sub>-a<sub>3</sub> is transferred to its cosynapse b<sub>2</sub>-a<sub>3</sub>, and excitation from b<sub>1</sub> is diverted to a<sub>3</sub>.

그림 8은 공통 자극주파수가 증가할 때 neuromime pair를 상반적으로 억제하였을 때의 발화형태를 나타낸 것이다.

각 pattern은 전 주파수 범위에 걸쳐 안정한 분포를 보이고 있으나 범위가 지나치게 넓어지는 경우에는 분포상태가 매우 고르지 못하다.

그림에서 1/0 : 1/0 : 1/1은 input train 중 첫째번 pulse가 들어 와 있는 동안 unit A는 firing 상태가 되며 unit B는 silent 상태가 됨을 가리킨다. 이것은 두번째 pulse에 대해서도 같은 원칙으로 되풀이 된다.

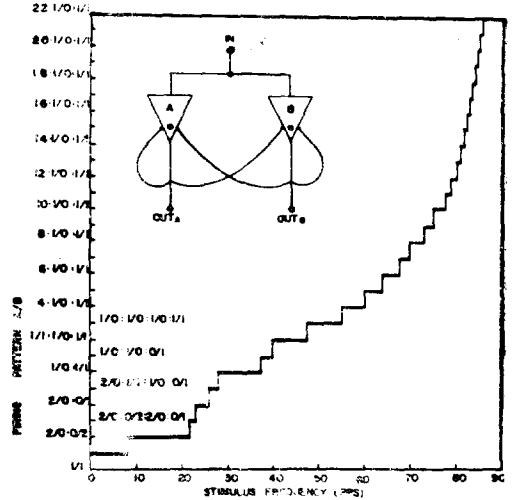


그림 8. Family of firing patterns obtained by reciprocally inhibiting neuromime pair as common stimulus frequency is increased.

The notation for the patterns represents sequential firing in the two units; each ratio represents the response to a single stimulus pulse.

제 3의 pulse에 대해서는 양 쪽 units가 동시에 반응함을 뜻한다. 즉 양쪽 units의 입력이 동기된 상태를 말해주는 것으로 그림 9는 입력자극 주파수에 대한 firing patterns과의 관계를 보여주고 있으며 이것은 그림 8에 대한 간단한 예이다.

즉 pattern p<sub>1</sub>이 존재하고(그림중 1/1 표시), 자극 주파수가 f<sub>H1</sub>으로 증가하면 new pattern p<sub>2</sub>로 불연속적인 jump를 하게된다(그림중 2/10 : 0/2)

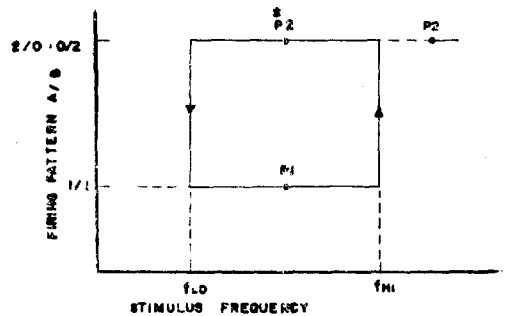


그림 9. Hysteresis of patterned response

그런 후 만일 입력 자극주파수가 감소되면 new pattern p<sub>2</sub>는 그대로 머무르게 되는데 특히 이 경우 최초

의 pattern  $p_1$ 의 자극주파수와 동일한 것으로 보고  $p_2^*$ 라고 말한다.

한편  $f_{L0}$ 에서는 본래의 pattern  $p_1$ 으로 자연적으로 회복되어 전체적 pattern은 hysteresis loop를 이루게 된다.

### 2.12 Stein (1970)의 모델

R.B. Stein은 현존하는 신경 모델화의 권위자로서 신경계의 모든 기능을 생리학적 측면, 수학적인 측면 및 공학적인 측면에 이르는 다양한 연구로 이 분야의 연구개발에 지대한 공헌을 하고 있다.

그는 신경계의 기능을 논리적으로 분석실험하기 위하여 그림 10과 같은 신경 모델의 불력선도를 구성하고 이에 대한 기술적인 문제를 개선하여 나가며 계속적으로 연구를 거듭하고 있다.

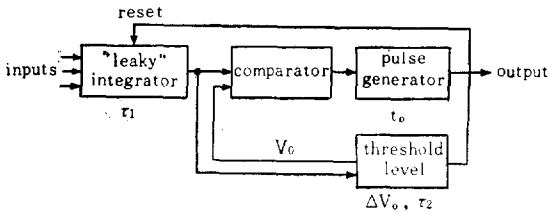


그림 10. Block diagram of the neural analog

R.B Stein 모델의 주요특징은

1) I.C 회로의 사용으로 신뢰도가 높고 간결하고 합리적이고 값싼 장치를 만드는데 많은 도움을 줄수 있었다.

2) 입력단에서의 신호와 출력단에서의 신호사이의 관계를 간단한 수학적인 방법으로 해석하기 위하여 사용된 operational amplifier는 normal data 뿐만 아니라 수학적인 혹은 디지털적인 시뮬레이션 모델사이의 상관관계를 알아보는데 매우 유익하다.

3) 모델의 구성에서는 과거의 모델에서 구별되지 않았던 adaptation과 accomodation의 중요한 신경특성을 모델화의 요소로 첨가하였다.

그림 10에서 볼 수 있는 것처럼 leaky integrator는 그의 시정수  $\tau_1$ 에 의하여 결정된 한 주기가 끝나는 사이 많은 입력을 모으는 역할을 한다. 이 시정수는 막시정수(membrane time constant)를 나타낸다.

그러나 이것은 흔히 수상돌기에서 나오는 신호의 수동적 퍼짐이나 혹은 막시정수에 비하여 긴 시정수를 가짐으로 감쇠되는 transmitter에 의하여 결과적으로 느려진다. 적분전압은 계속적으로 문턱전압  $V_0$ 와 비교된다. 그리고 적분전압이 문턱전압을 능가할 때 하나의 펄스가 출력에서 발생된다.

Subthreshold voltage는 아나로그 모델이 천천히 입력되는 입력에 대하여 accomodation 함을 보여주기 위하여 시정수  $\tau_2$ 로 threshold level을 증가시키게 된다.

비록 이 모델이 신경기전(neural mechanism)의 지나치게 단순화된 해석이 될지도 모르나 역시 많은 신경 요소의 기능적 해석을 위해서는 바람직한 모델로 인정 받고 있다.

Harmon은 그의 억제성 입력을 사용하여 Hill의 모델을 approximation 할 수 있었으나 두 회로의 동작면에 있어서는 많은 차이점이 있었다. R·B Stein의 모델에서 각 출력펄스는 Integrator를 Reset하고 pulse가 끝날때까지 초기값을 계속 유지하는 역할을 한다. 그러므로 pulse duration  $t_0$ 는 즉 제 2의 pulse가 발생되지 않는 동안의 주기인 analog 모델의 절대불응기를 결정한다.

또한 각 pulse는 문턱값을  $\Delta V_0$ 만큼 증가시키며 그 결과 시정수  $\tau_2$ 로 감쇠된다. 만일  $\tau_2$ 가 pulse 사이의 normal interval에 비하여 짧으면, 그것은 제 2 pulse를 보다 적게 풀어 내게 되는 상대불응기를 결정한다. 그러나  $\tau_2$ 가 pulse 사이의 intervals에 비하여 길다고 하면 문턱값의 증분은 accumulating되며 점차적으로 방전을 일으키게 한다.

pulse의 크기가 3volt로 일정하기 때문에 이 adaptation의 크기는 pulse 사이의 intervals에 비례하는 apulse duration을 결정하게 된다. 이때 parameter는 daptation의 시정수를 결정한다.

### 2.13 Colburn(1973)의 모델

이 모델은 신경생리의 주요 어려운 문제점들에 대하여 해결방법을 찾고자 하는 연구자들에게 많은 도움을 주고 있다. Colburn은

1) 수상돌기의 배열에서도 시냅스입력의 중요한 요소인 spatial distribution이 있는지의 여부를 확인하고 싶었다. 따라서 수상돌기의 정열상태를 공식화 할 수 있도록 하였고, synaptic inputs을 temporal pattern으로 이끌 수 있도록 하였다.

2) 연구자들은 신경주위의 extracellular potential distribution 상태를 알고져 했다.

이 점을 해결하기 위하여 그는 먼저 intracellular distribution 상태를 관찰하였다.

이 정보로부터 그는 여러형태의 기하학적 위치변화로 extracellular potential map를 그릴수 있었다. 이것은 여러개의 segment로 나눈 신경의 아나로그 모델로서 intracellular spatial potential distribution을 제시하여 주고 있다. 이 모델은 Rall(1961)의 passive



compartmental model의 응용으로 spibe potential의 발생장치가 첨가되고 모든 데이터는 생리적 특성 데이터가 사용되었다.

그림 11은 Rall에 의하여 발표되었던 것처럼 모든 흥분성 자극이 최초로 발생된다는 soma로 부터 일정한 간격을 갖는 다섯 개의 compart로 신경의 수상돌기 위치를 평면적으로 나타내주고 있다.

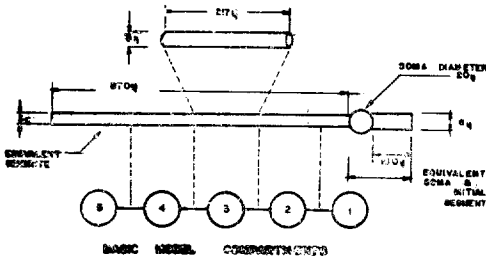


그림 11. Equivalent Neuron. The equivalent neuron simulated by a 5-compartment model and the mapping from one to the other are shown.

The insert shows the dimensions of a single compartment.

그림 12는 가능한 spatial configuration의 예로서 다섯 개의 compart에서 아홉 개의 compart로 증가된 상태를 보여주고 있는데 compart수의 증감에 따라서 compartmental coupling resistances 값이 문제가 되므로 구성되는 아나로그 모델의 특성범위에 맞게 결정되어야 할 것이다.

한편 compart의 배열에 따라서 synapse inputs의 spatial summation에 많은 영향을 주고 있기 때문에 세 가지 경우로 배열시켜 본 것이다. 그림 12-(a)의 경우는 branch 부분의 저항값은 2배가 되는 반면에 cap

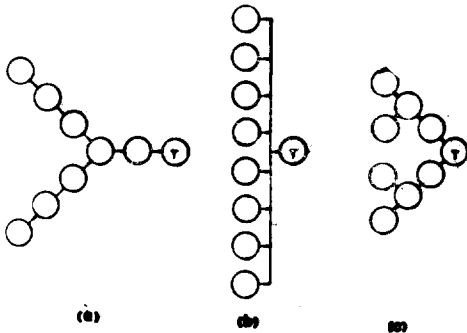


그림 12. Possible spatial configurations. Three ways that the extended 9-compartment model can be arranged to study the effectiveness of various dendritic nets are shown.

acitance 값은 impedance matching과 time constant의 고정문제로 절반으로 감소된다.

그림 13은 다섯 구획(compart)으로 된 수상돌기 모델의 블럭선도이다.

모델의 기본요소로는 수상돌기 구획의 저항 및 정전용량을 시뮬레이션 하기 위하여 gate 회로를 사용하였다. 여기서 구형과 입력펄스가 발생된다. 한편 모델에서의 활동전압은 hyperpolarized conductance generator 와 depolarized conductance generator를 사용하였다. trigger region에서 시뮬레이션 된 막 전압은 계속적으로 증폭되어 표준전압과 비교된다. 이때 신호가 문턱값을 초과하게 되면 Schmitt Trigger는 accommodation 혹은 Rate capacitor를 통하여 one-shot trigger를 발사하게 한다.

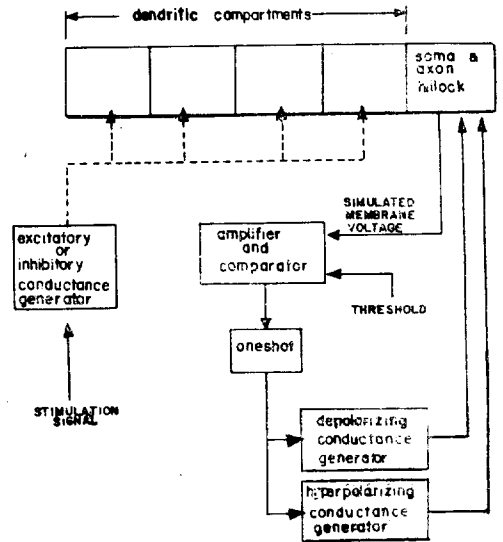


그림 13. Block diagram for the basic 5-compartment model

### 3. 結 論

본 고찰은 신경의 생리적 현상을 기능적 측면에서 아나로그 모델로 시뮬레이션 시켜가는데 있어 모델화의 역사적 발달과정과 기존모델의 특성을 간략하게 요약하고 이들을 비교 검토한 것으로 초기(1776)의 모델화에 대한 철학적인 개념으로부터 TR, IC등의 전자부품을 사용한 최근(1973)의 모델에 이르기까지 많은 기존모델을 다루어 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 역사적 발달과정에도 잘 나타난 것처럼, 전기, 화학, 역학, 수학등 여러분야의 전문적 지식의 교환없이 모델화의 정확성, 분석상의 신뢰도, 결과에 대한 보편성이 결여되기 쉽다.

2. 특히 생리적 특성 및 수학적인 면밀한 고찰과 분석이 요구되고 있다. 이는 모델의 특성 결과에 대한 디지털 전자계산기를 이용한 통계적 처리와 시뮬레이션을 용이하게 할 수 있고, 임상에서의 이용 가능성을 높여나가기 위해서이다.

3. 신경 전체에 대한 모델화에 앞서 신경의 구조별 모델화가 선행되어야 한다.

이는 신경의 구조중 수상돌기 및 soma에서의 synaptic inputs에 대한 위치변화에 따른 synaptic potential의 분포상태가 신경의 특성을 규명하는데 매우 유익하다는 사실이 밝혀졌기 때문이다.

4. 신경에서의 synaptic potential의 분포상태는 종전에는 temporal distribution 개념이 지배적이었으나 최근에 와서는 spatial distribution 개념이 우세하게 되었다.

참 고 문 헌

1. L.D. Harmon and E.R. Lewis, "Neural Modeling," *Physiol. Rev.*, Vol. 46, pp. 513-591, 1966.
2. J.W. Moore, "Specifications for Nerve Membrane Models," *Proceeding of the IEEE*, Vol. 56, No. 6, pp. 895-905, June 1968.
3. A.A. Verveen and H.E. Derksen, "Fluctuation Phenomena in Nerve Membrane," *Proceeding of the IEEE*, Vol. 56, No. 6, pp. 906-916, June 1968.
4. D.Brown and M. Hall, "Pattern Transformation by Neural Nets," *physiol. Soci.* pp. 79-89, April 1970.
5. A.S. French and R.B. Stein, "A Flexible Neural Analog Using Integrated Circuits," *IEEE Transaction on Bio-Medical Engineering*, Vol. B ME-17, No. 3, pp. 248-253, July 1970.
6. D.J. Cleverly and A. Hooly, "A Simple High Speed Neuromime" *Physiol. Soci.* pp. 39-59, July 1971.
7. E.W.Pottala and T.R. Colburn, "A Dendritic Compartment Model Neuron," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. BME-20, No. 2, pp. 132-139, March 1973.
8. J.J Almast and O.H.Schmitt, "Automated Measurement of Bioelectric Impedance at very low Frequencies," *Computers and Biomedical Research* 7, pp. 449-456, 1974
9. R.B. Stein and K.V. Leung, "Improved Neuronal Models for Studying Neural Networks," *Kybernetik* 15, pp. 1-9, 1974
10. P.Z. Marmarelis, "Experimental Analysis of a Neural System: Two Modeling Approaches," *Kybernetik* 15, pp. 11-26, 1974.
11. R.B. Stein, "Regeneration Electrode Units: Implants for Recording from Peripheral Nerve Fibers in Freely Moving Animals," *Science*, Vol 183, pp. 547-549, 1974.

<p.47에서 계속>

表 3. 位置設定 一覽表

計算機	外部制御方式	制御對象	loop數
DDC No. 1	定電壓制御	Depiler lifter	1
		加熱爐 Pusher	2
		R <sub>1</sub> 壓下 screw	1
		粗壓延 Side guide	6
	可變電壓制御	加熱爐 extractor	4
		R <sub>2</sub> -R <sub>4</sub> 壓下 screw	3
E <sub>2</sub> -E <sub>4</sub> edger		5	
AC 制御	粗壓延幅計	1	
DDC No. 2	定電壓 制御	仕上 Side guide	8
	可變 電壓制御	仕上 壓下 screw	7
	Pulse motor制御	仕上 壓延 速度 (MRH SSRH)	9
	AC 制御	仕上 壓延幅計	1
DDC No. 3	定電壓 制御	Coiler pinch roll	2
		Coiler wrapper roll	6
	可變 電壓制御	Coiler side guide	2
		Coiler mandrel	2

機의 正逆轉, 壓下, side guide, edger 等の 位置設定이 pass의 進行에 따라 연속적으로 이뤄진다. table, 壓延機의 速度에 關하여는 Load cell 信號를 基準으로 해서 減速 및 逆轉의 timing을 計算하여 制御를 行하고 있다.

4. 結 論

浦項綜合製鐵(株)에서는 國內 最初로 熱延工場의 AGC(Automatic Gauge Control)用으로 小型計算機를 1975年 7月 設置하여 現在 成功的으로 稼動中에 있으며, 앞으로 熱延工場以外에 冷延工場, 燒結工場, 高爐工場, 分塊工場, 製鋼工場, Energy Center等에도 制御用 計算機를 導入할 豫定으로 있다.

本稿가 計算機 System 設計 및 使用에 關心이 있는 분들에게 조금이나마 參考가 되기를 바라며, 概括的이나마 外國의 實例를 살피 본 것으로 하였다. 앞으로 우리 自體의 것으로 報告할 機會가 오기를 期待하면서 많은 指導와 諒달을 바라는 바이다.

參考文獻

1. 野坂康雄編著 鐵鋼業의 컴퓨터. 컨트롤 産業圖書株式會社 1970
2. 鐵鋼 Automation會議 論文集 Luxembourg, Düsseldorf Section 1970