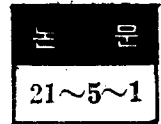


시각계통의 시·공간적 특성 해석

Spatio-temporal Characteristics Analysis of Visual System



한 만 춘* · 박 상 희** · 김 강 서***

(Man Choon Han, Sang Hui Park, Kang Suh Kim)

Abstract

Applying the theory of physiology and control systems, the visual system was studied as a regulator of impinging light.

The characteristic function of visual system is mainly analysed by spatio-temporal characteristics based upon Enroth's model, Broca-Sulzer phenomenon and Mach effect. Some aims of this paper are as follows.

(1) In order to get the excitatory and inhibitory potential of the intermediated cell layer in the retina, the exponential value, $\{exp(FM/kT) - I_{mn}\}$ is calculated based on the physiological theory in neuro-phenomena.

(2) To show the visual characteristics by analog simulation for generating stimulus waveforms and anlysis, the visual adaptation was recorded as electrical stimulation in the form of step functions.

Furthermore, it is shown that the above experimental data agrees satisfactorily with the theoretical (psychophysiological) values.

This study is expected to lead to further studies concerned with human observer and human operator in control and especially pattern recognition systems.

1. 서 론

오늘날의 생체공학(bio-engineering)은 의학 및 국방과 관련된 여러 문제를 다루는 새로 발전하는 분야로서 인간 특성의 이해, 질병의 진단 및 인류의 복지 향상에 기여 하고 있다. 생체계통 중에서도 특히 시각계통에 관한 이론적인 진보는 생체공학에서 새로운 면을 제공할 수 있는 분야이다.

시각계통은 고등동물에 있어서 가장 관동적인 감각기관으로 외부에서 들어 오는 시각정보를 변환하여 그 자료를 처리하고 인식한다. 실제로 중추신경계에서 평가되는 처리과정은 매우 복잡한데, 이러한 시각계통의 해부학적 구조와 그 생리학적 기능에 관하여는 여러작

도이식 연구가 이루어져 왔다. 특히 시각계통을 물리학적인 면에서 처음으로 고찰한 Herring¹⁾은 시각내에 두개의 제어 과정(self adaptation)이 포함되어 있는데, 이를 동시성 순응(simultaneous adaptation)과 계시성 순응(successive adaptation)이라 명명 하였다. Herring이 제창한 시각계통에서 두개의 제어과정을 Biernson²⁾³⁾은 보다 구체적인 면에서 보고 동시성 순응을 공간적 순응(spatial adaptation), 계시성 순응을 시간적 순응(temporal adaptation)이라 개칭 하였다. 본 논문에 소개되는 시·공간적이란 말은 광학적인 의미⁴⁾로서 뿐 아니라, 망막내에서 각 세포층의 연결강도⁵⁾ 및 전달시간에 관한 특성을 포함하고 있다.

본 논문에서는 시각현상을 효과적으로 표현하기 위해서 이에 대한 심리학, 생리학적인 특성을 고찰하여 시각의 시·공간적 모델을 새로히 구성하였으며, 이의 응답으로서 그 타당성의 검토를 시도한 결과를 보고하는 것이다.

* 정회원 : 연세대학교 이공대학장(공학박사)

** 정회원 : 연세대학교 이공대학 전기공학과 조교수(공학박사)

*** 정회원 : 연세대학교 이공대학 전기공학과 조교

2. 시각계통의 제 특성

(1) 신경세포의 전기작용

신경세포는 자극에 의하여 세포막 내 외에 K^+ , Na^+ , Cl^- 이온의 농도를 변화 시키는데, 이때 농도차에 의한 삼투력과 전위차에 의한 Coulomb력 등이 의해 세포막 전위차가 식(1)과 같이 나타나다⁹⁾.

$$V_m = \frac{kT}{F} \ln \left\{ \frac{P_K(K^+)i + P_{Na}(Na^+)i + P_C(Cl^-)o}{P_K(K^+)o + P_{Na}(Na^+)o + P_C(Cl^-)i} \right\} \quad (1)$$

- 여기서 V_m : 세포막 전위
- T : 절대온도(켈빈)
- F : Faraday 정수
- P : 이온의 투과정수
- (i) : 내부로 침투되는 이온
- (o) : 외부로 배출되는 이온

Na^+ 와 K^+ 의 활동에 대한 시간 지연 관계의 비는 대략 1:5 정도이며, 신경전유에서는 세포막전위(membrane potential)가 세포막 저항(membrane resistance)을 테개로 하여 정귀환되고 문턱값(threshold value) 이상의 자극에 대하여 급격히 증가하여 신경 임펄스, 즉 활동전위(action potential)를 나타내게 된다.

(2) 망막의 구조와 기능

광이 외계의 물체에 닿으면 물체의 성질에 따라 반사광이 번져서 시각패턴을 형성하고 이것이 수정체를 거쳐서 망막에 실상을 맺게 한다. 망막에서 광을 전기적인 신호로 바꾸는 변환기가 시각세포(receptor cell)인데, 시각세포는 간상세포(rod)와 추체세포(cone)의 두 형태로 되어 있다.

시각 세포층의 출력은 쌍극세포(bipolar cell), 수평세포(horizontal cell)와 아마크린세포(amacrine cell) 등을 포함하는 중간 세포층(intermediate cell layer)을 거쳐서 신경전 세포층(ganglion cell layer)으로 들어가며 신경전 세포층의 출력은 외측 슬상체(lateral geniculate body)에서 증폭되어 시방선을 거쳐 뇌 후두 피질에 있는 시각영역에 이른다.

(3) 시각의 시·공간적 특성

광의 강도 $f(x,y,t)$ 에 따라 시각에 밀어지는 광의 양 $L(x,y,t)$ 는 식 (2)와 같이 주어진다⁹⁾.

$$L(x,y,t) = \bar{L} (1 + m \cdot f(x,y,t)) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 \bar{L} 은 수광의 평균값이고 $m = \Delta L / \bar{L}$ (ΔL 은 변조폭)이다. 민일 $f(x,y,t)$ 가 시간적으로 일정하고 공간적으로 제단함수 형태라면 $L(x,y)$ 를 Mach 효과, $L(t)$ 를 Broca-Sulzer 현상 등으로 부른다¹⁾. 이 두 현상은 모두 과도현상을 나타내는데, $L(x,y)$ 를 시각의 공간적 특성, $L(t)$ 를 시각의 시간적 특성이라고 한다⁵⁾.

그림 1은 이를 나타낸 것이다.

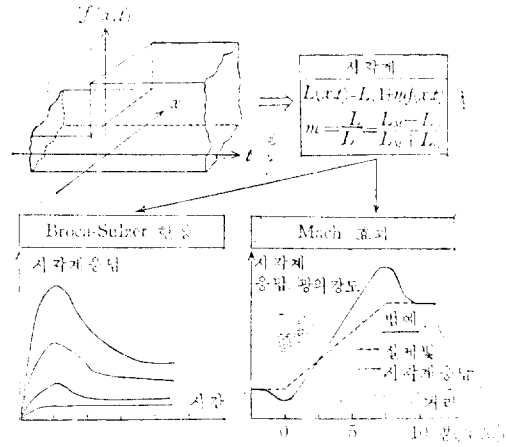


그림 1. 시각의 시·공간 특성
Fig. 1. Spatio-temporal characteristics of visual system

3. 시각 모델의 유도

(1) 가정의 설정

복잡한 시각현상을 간단한 수학적식으로 표현하기 위하여는 몇가지 타당한 가정을 설정하여야 하는데 본 논문에서는 아래와 같은 가정을 설정 하였다.

a) 시각의 입력을 시각 세포층으로, 출력은 신경전 세포층으로 하며, n 개의 입력에 대하여 m 개의 응답이 나온다. 특히 일·출력의 각 원소들은 서로 독립이며 $n > m$ 으로 한다.

b) 입력 세포층에서는 시간특성과 광학적 공간특성이 존재하며, 출력 세포층에서는 시·공간특성을 무시한다.

c) 중간 세포층에서는 p 개의 입력과 q 개의 출력을 가지며 흥분성전위(excitatory potential)와 억제성전위(inhibitory potential)의 두 전위가 상호작용을 한다. 흥분성 전위의 시간특성은 억제성 전위의 시간특성에 비하여 꼭 직으로 무시하며, 이의 공간적 특성은 모두 Gauss 분포 함수의 형태다⁷⁾⁸⁾.

d) 시각 세포층과 신경전 세포층 사이에는 개시중심형(on-center type)과 종료중심형(off-center type), 그리고 개시종료중심형(on-off-center type)의 수용영역(receptor field)으로 구성되어 있는데⁹⁾, 본 논문에서는 개시중심형 수용영역만 취급한다.

e) 시각의 모델은 순방향 억제성(forward inhibition) 모델과 역방향 억제성(reverse inhibition) 모델로 배열될 수 있는데¹⁰⁾, 본 논문에서는 순방향 억제성

모델만을 취급한다. 순방향 억제성 모델은 그림 2와 같다.

f) 모든 정보는 편위상 아나로그양으로 취급한다.

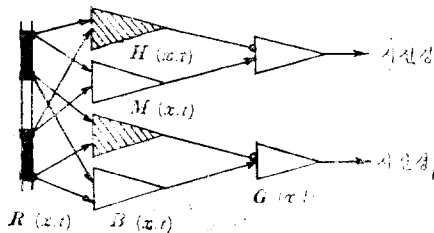


그림 2. 시각의 순방향 억제성 모델
 Fig. 2. Forward inhibition model of visual system

(2) 시각의 시·공간적 모델의 유도

전향의 가정에 의하여 시각세포층에 E의 광의 자극을 가하여 신경전 세포층에 출력 A가 나왔을때, 그 계통도는 그림 3과 같다.

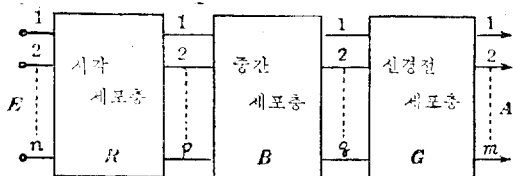


그림 3. 광자극의 전달 계통
 Fig. 3. Transfer system of light stimulation

그림 3에서 n개의 입력에 대하여 m개의 출력을 얻는 이 계통은 식(3)과 같이 표시된다.

$$A = G \cdot B \cdot R \cdot E \dots\dots\dots(3)$$

- 여기서 $E = \{e_i\}$: n차 입력 벡터
- $A = \{a_i\}$: m차 출력 벡터
- $R = \{r_{ik}\}$: $p \times n$ 의 입력 세포층 행렬
- $B = \{b_{ik}\}$: $q \times p$ 의 중간 세포층 행렬
- $G = \{g_{ij}\}$: $m \times q$ 의 출력 세포층 행렬

식(3)에서 R, B와 G는 생리학, 심리학적 자료로서 결정 되어야 할 행렬이다. 가정에 의해 R은 모두 같은 시간특성 $\{w_1(t)\}$ 를 갖고 있다. 또한 망막 전체에 시각 세포가 같은 양의 광을 받게 할 수 있다면, 즉 망막의 극소 부분을 평면으로 생각하고 이 곳에서 시각세포의 밀도가 거의 일정하다면 광학적 공간특성은 무시할 수 있으므로 이 때 식(4)가 성립한다.

$$R = \{w_1(t)\} I_n \quad (4)$$

여기서 I_n 은 $n \times n$ 의 단위행렬이다. 그리고 가정에 의하여 G는 식(5)와 같다.

$$G = I_m \quad (5)$$

여기서 I_m 은 $m \times m$ 의 단위행렬이다. 중간 세포층 행렬 B는 차원이 $m \times m$ 행렬이 되며, 이 계통은 n개의 입력에 대하여 m개의 출력이 나오므로 B내에서 $n-m+1$ 개의 원소가 공간적으로 서로 연결되어 있다고 볼 수 있다. 그리고 입·출력의 각 원소가 독립이고, 순방향 억제성 모델의 각 입력 원소에 대하여 그 출력 원소가 모두 Gauss 분포 관계를 갖고 있으므로 B는 식(6)과 같이 된다.

$$B = \begin{pmatrix} \alpha_1 \alpha_2 \dots \dots \dots \alpha_{n-m+1} & & & & & 0 \\ & \alpha_1 \alpha_2 \dots \dots \dots \alpha_{n-m+1} & & & & \\ & & \dots \dots \dots & & & \\ 0 & & & \alpha_1 \alpha_2 \dots \dots \dots \alpha_{n-m+1} & & \\ & & & & & \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-m+1}$ 은 수용영역의 공간적 연결강도이다.

중간 세포층에서는 시각 세포층에서 전달되는 발전전위(generator potential)를 흥분성전위와 억제성전위의 차로써 신경전 세포층에 전달 되므로 식(7)이 성립된다.

$$B = M - \{w_2(t)\} H \quad (7)$$

여기서 M은 흥분성 전위 행렬, H는 억제성 전위 행렬로서 그 차원이 $m \times n$ 이다. 또 $\{w_2(t)\}$ 는 억제성 전위의 시간특성이다.

(3) 흥분성, 억제성전위의 비선형 관계

개시중심형 섬유는 광의 자극에 의해 중심에 양이온의 농도가 증가하면 이에 따라 음이온의 농도가 증가하게 되는데, 음이온의 농도 증가는 비선형적이다. 또 음이온의 농도는 특정된 문턱값 이상에서만 그 특성을 나타낸다. 이 비선형적 관계를 함수로 나타내기 위하여 식(1)로 정의된 Goldman 방정식에서 Na^+ 만을 생각하면 식(8)과 같이 된다.

$$V_m = \frac{kT}{F} \ln \frac{P_N [Na^+] i}{P_N [Na^+] o} \quad (8)$$

식(8)에서 신경세포내의 전압상승은 $P_N [Na^+] i$ 이고, 전압상승시 Na^+ 의 유출량은 없으므로 $P_N [Na^+] o$ 는 일정하다.

P_N 은 침투율을 나타내고 전기적으로 전도도에 대응하므로, 다음의 식(9)를 얻을 수 있다.

$$g = g_o \exp\left[\frac{F V_m}{kT}\right] \quad (9)$$

그러면 $g = dJ/dV_m$ (J는 전류)이므로 식(9)를 0에서 어느 기준전압 V까지 적분하면 식(10)을 얻는다.

$$J = J_o [\exp\left\{\frac{F V}{kT}\right\} - 1] \quad (10)$$

여기서 J_o 는 전류의 초기값 $\left(\frac{F}{kT} g_o\right)$ 이다. 식(10)은 Schockley¹¹⁾가 보인 접합다이오드의 특성식과 같은 유형의 식이다. 그런데 광의 자극강도에 의하여 흥분성전위 M이 증가되고, M에 의해 억제성 전위 H가 증

가하므로 식(10)에서 J 를 전압으로 바꾸어 H 에, 그리고 V 를 M 에 대응시키면 식(11)과 같이 된다.

$$H = H_0 \left[\exp\left\{\frac{FM}{kT}\right\} - I_{nn} \right] \quad (11)$$

여기서 I_{nn} 은 각 원소가 1로서 구성된 $m \times n$ 행렬이다. 또 식(11)에서 음이온은 양이온의 증가에 따라 지수 함수적으로 증가함을 알 수 있다.

이상의 결과들을 종합하면 식(3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \{ \{w_1(t)\} M - \{w_2(t)\} H_0 \left[\exp\left(\frac{FM}{kT}\right) - I_{nn} \right] \} \cdot E \quad (12)$$

식(12)가 시각계통의 시·공간적 수학적 모델이다.

(4) 시각모델에 의한 시·공간 현상

앞에서 유도한 식(12)는 시각계통의 시·공간적 현상을 나타낸다. 여기서 $\{w_1(t)\}$ 와 $\{w_2(t)\}$ 를 결정하고 또 식(6)의 연결강도 특성을 결정하여야 한다.

먼저 시간특성인 $\{w_1(t)\}$ 와 $\{w_2(t)\}$ 를 일차지연제로 놓으면 그 현상은 시각계통과 잘 일치된다. 즉,

$$w_1(t) = \frac{1}{s\theta + 1} \quad (13)$$

$$w_2(t) = \frac{1}{sD + 1} \quad (14)$$

여기서 θ 와 D 는 시정수이며, s 는 미분연산자이다. 특히 θ 와 D 는 $\theta \leq D$ 인 관계가 있다¹²⁾.

다음 공간특성인 식(6)의 α_i 는 개시중심형 수용영역에서 흥분성, 억제성 전위분포를 조사 하므로써 알 수 있다.

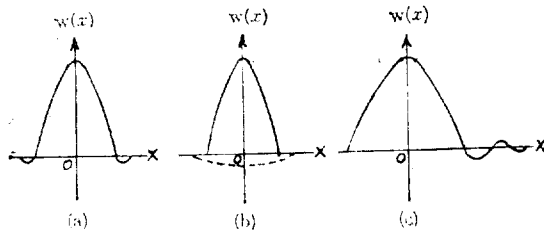


그림 4. 수용영역의 공간적 연결강도의 분포
Fig. 4. Spatial distribution of strength connection in receptor field

그림 4(a)는 개시중심형 수용영역에서 전위분포를 나타낸 것이다. 이러한 시각의 공간적 효과를 수학적 모델로 나타내기 위해서 시각경로가 어떤 직렬중계소를 포함하고 있다면 공간함수 $f(x)$ 의 선형사상(linear mapping)은 다음의 함수로 나타낼 수 있다¹³⁾.

$$Y(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) W(x) dx \quad (15)$$

여기서 $W(x)$ 는 연결강도를 나타내는 함수(하중함수)이며, $Y(x)$ 는 선형 사상이다. 특히 $W(x)$ 를 양·음 Gauss 분포함수의 합이라 하고, 또 흥분성전위는 중

심에, 억제성 전위는 주위에 있다고 하면 대략 그림 4(a)(b)와 같은 분포를 나타낸다.

근사적인 Gauss 분포함수의 합 $W(x)$ 를 결정하기 위하여 식(15)를 Fourier 변환 하면 다음과 같다.

$$\hat{Y}(\omega) = \hat{W}(\omega) \cdot \hat{F}(\omega) \quad (16)$$

가령 입력함수 $\hat{F}(\omega)$ 의 n 번째 사상에 대하여는 다음과 같이 된다.

$$\hat{Y}_n(\omega) = \hat{W}^n(\omega) \cdot \hat{X}(\omega) \quad (17)$$

식(17)에서 n 이 ∞ 로 된다면 $\hat{Y}_n(\omega)$ 는 설정된 공간 λ 내에서 유한이어야 하며 이 극한의 성질로 미루어 $W(\omega)$ 는 1보다 크지 않음을 알 수 있다. 그러므로 이런 함수를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$W(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sin \lambda X}{X} \quad (18)$$

식(18)로 표시된 sinc 함수는 좌우 대칭으로 최대, 최소값을 갖으며 그림 4(c)가 이를 나타낸 것이다.

결과적으로 식(6)에 표시된 행렬은 대략 식(18)과 같은 관계를 갖으며 시각에 대한 광의 일차원적 자극은 식(18)과 같은 sinc 함수의 어느 구간 X_1 로부터 X_n 까지의 선형체적이라고 볼 수 있다. 또 이는 Mach 효과와 거의 같은 현상을 나타낸다.

4. 실험 및 결과고찰

(1) 실험장치의 구성과 실험

본 실험에서는 식(12)를 기본으로 하여 광의 계단함수적인 자극에 대한 시각의 시간적 특성을 구하기 위하여 그림 5와 같은 블록선도에 의해 그림 6과 같이 상사형 건가계산기로 시뮬레이션 하였다.

그림 5에서 $\left[\exp\left\{\frac{FV}{kT}\right\} - 1 \right]$ 의 시뮬레이션은 $P-N$ 접합 다이오드를 이용하였다. 그러므로 이 계통의 반응의 크기를 임의의 단위로 설정하였다. 여기서 $\theta = 0.02$ 초, $D = 0.1$ 초로 하였으며¹⁴⁾, 문턱값은 1volt로 하

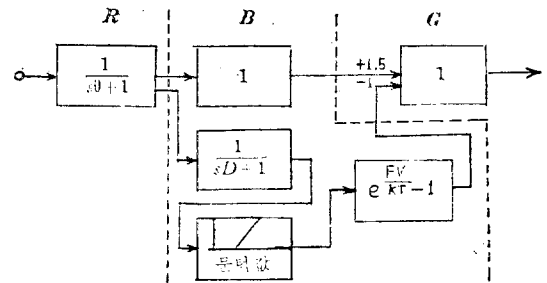


그림 5. 시각 모델의 블록선도
Fig. 5. Block diagram of visual system model

였다. 이 분턱값은 실제와 큰 차이가 있으나, 반응의 크기가 임의의 단위이기 때문에 별 문제는 안된다. 또

한 흥분성 전위와 억제성 전위의 비율 1.5:1로 하였다⁸⁾.

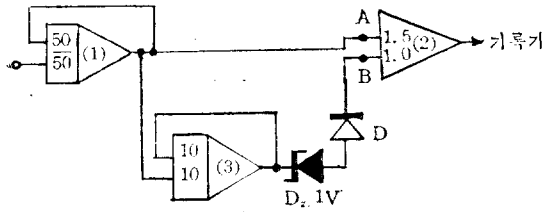


그림 6. 그림 5의 아나로그 시뮬레이션
Fig. 6. Analog simulation of Fig. 5

그림 6에 대한 입력으로는 계단함수를 전기적으로 가하였으며, 이 전기적 계단함수는 광의 계단적인 자극강도를 전기적인 신호로서 대응 시킨 것이다. 이때 각 계단함수의 크기는 1, 2, 4, 6, 8, 10 volt로 하였고 응답을 받는 기록기는 입력범위가 50volt, 속도는 50mm/sec로 하여 그림 7(a)~(f)와 같이 기록하였다. 또한 근사적인 공간적 현상을 구하기 위해서 그림 6의 A, B 각점에서 흥분성 전위와 억제성 전위의 과도현상을 그림 7(g), (h)와 같이 기록하였다.

(2) 실험결과의 고찰

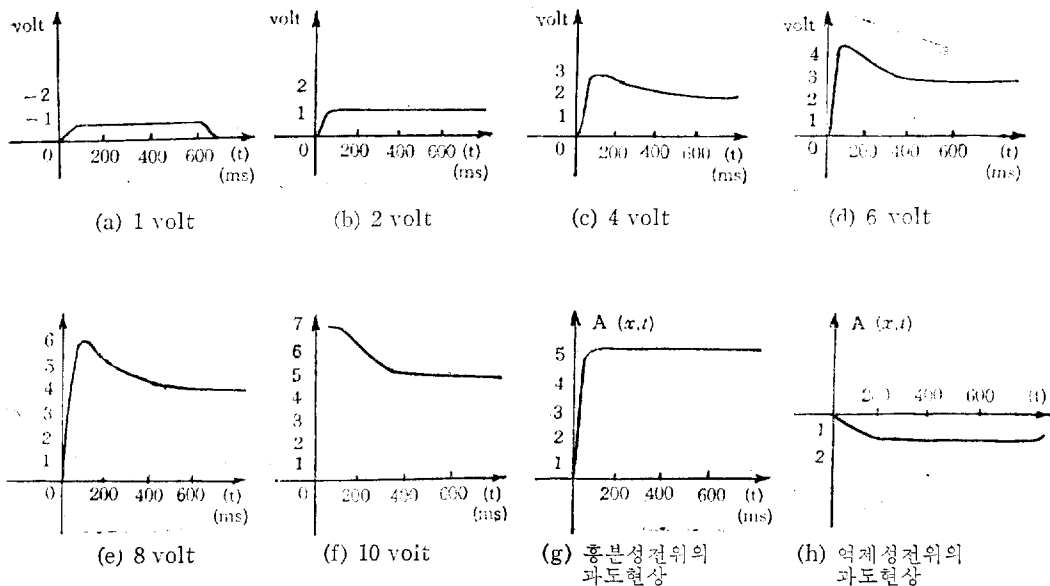


그림 7. 실험에 의한 시각계통의 응답
Fig. 7. Response of visual system based on analog simulation

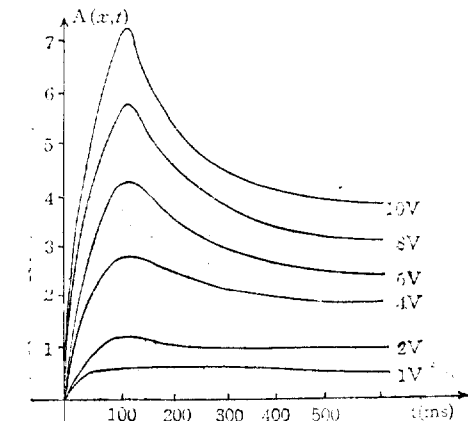


그림 8. 시각계통의 시간응답
Fig. 8. Temporal response of visual system

본 실험에서, 입출력 관계에 의한 수학적 모델이 실제 Broca-Sulzer 현상, Weber-Fechner의 법칙 및 Mach 효과를 만족하는 가를 검토 하여 본다.

그림 8은 그림 7(a)~(f)의 기록을 공통 좌표상에 옮겨 놓은 것으로 Broca-Sulzer 현상을 만족하고 있음을 나타내고 있다.

다음에 그림 9는 그림 7(a)~(f)의 기록에서 자극의 크기에 대한 계통의 순응된 응답을 나타낸 것으로 대수함수적으로 증가됨을 보이고 있다. 이는 시각모델이 Weber-Fechner의 법칙도 만족하고 있음을 나타내는 것이다.

시각의 공간적 현상에 대한 실험은 식(18)과 그림 4에서 나타낸 바와 같이 Gauss 분포상태를 나타내야 할 것이다. 그런데 시각계통은 시간·공간적인 현상이 서

로 필립하르트²³⁾, 근사적인 공간특성은 시간적 현상을 이용하여 얻어 질 수 있다¹⁹⁾. 그림 7(g)와 (h)의 대응된 진술 따하여 한 좌표에 표시한 것이 그림 10(a)이며 그림 10(b)는 이를 종합한 것이다. 그림 10(b)를 보면 Mach 효과와 거의 일치됨을 알 수 있으며 시각은 좌우가 대칭 이므로¹²⁾ 그림 10(c)와 같은 공간적 현상을 추측 할 수 있다.

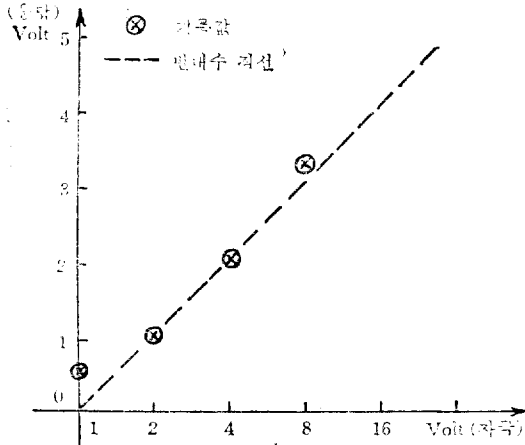


그림 9. 순응된 응답과 자극간의 관계
Fig. 9. Adapted response & stimulus

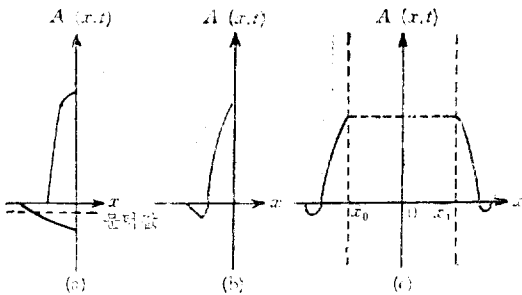


그림 10. 시각계통의 공간적 특성
Fig. 10. Spatial characteristics of visual system

5. 결 론

본 논문은 시각 인식계통에 대한 기초적 연구로서 시각계통의 수학적 모델을 유도하여 이의 아나로그 시뮬레이션에 전기적인 자극을 가하였을 때의 응답으로부터 제어공학적인 방법으로 시각의 시·공간적 해석을 시도한 것인데, 그 중요 결과는 다음과 같다.

- (1) 시각모델에서 흥분성 전위와 억제성 전위 사이에 지수함수적인 관계를 유도하였다.
- (2) 시각모델의 시·공간적 순응이 Broca-Sulzer 현상과 Mach효과 및 Weber-Fechner의 법칙에 일치됨을 검증 하였다.

(3) 중간 세포층의 연결강도가 근사적으로 sinc함수의 선형 웨이브를 유도하였다.

그리고 본 연구의 결과는 시각계통의 동적해석, 모델화 및 모델의 최적화의 연구, 망막의 정보처리 기능과 신경계통의 인공적 회로망 구성에 관한 연구에 기여될 수 있는 자료가 될 것이다.

참 고 문 헌

1. Levine, S.N.; Advanced in Biomedical Engineering and Medical Physics, Vol. 2. Interscience, 1968.
2. Biernson, G.; "A Feedback-control Model of Human Vision". Proc. IEEE, Vol. 54, No.6, Jun. 1966, pp.(858-872)
3. Biernson, G.; "A Feedback-control Model of Human Vision". Proc. IEEE, Vol. 54, No. 6, Jun. 1966, pp.(1229-1229)
4. Goldman, J.W.; Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill, N.Y. 19685.
5. Yonsei Univ.; "Lecture Manual of Medical Physiology", Dept. of Physiology, Yonsei Univ., College of Med., 1971
6. Yasuda, M. & Hiwatshi, K.; "A Model of Retinal Neural Networks and its Spatio-temporal Characteristics"., NHK Lab. Note, NHK, TOKYO, 1968.
7. Bloch, E. etal; "Introduction to Biological System Science", NASA CR-1720, NASA, Feb., 1971.
8. Fukushima, K.; "Visual Feature Extraction by a Multi-layered Network of Analog Threshold Element", IEEE Trans. SSC-5, No.4 Oct. 1969
9. East, C.H. & Taylor, N.B.; The Physiological Basic of Medical Practice, 6th ed., William & Wilkins, Baltimore, 1955.
10. Enroth-Cugell, C. & Robson, J.G.; "The Contrast Sensitivity of Retinal-ganglion Cell's of the Cat", J. Physiol. 187, 1966, pp.(517-552)
11. Schockley, W.; Electron and Holes in Semiconductors Van Nostrand, N.Y. 1950.
12. Yamaguchi, Y. etal; "Electronic Retina", NHK Laboratory Note, No. 141, Mar. 1971.
13. Broda, E.etal; Biophysics of Cell and Organs Verlag der Wiener Medizinischen Academie, Proc. Vol. 5, 1971.