

論文2002-39SC-6-7

# 전기생리학적 기전에 근거한 망막 모델의 제안과 시공간적 응답의 분석

## (Proposition for Retina Model Based on Electrophysiological Mechanism and Analysis for Spatiotemporal Response)

李政祐\*, 蔡承杓\*\*\*, 曹辰鎬\*\*\*, 金明南\*\*

(Jeong Woo Lee, Seung Pyo Chae, Jin Ho Cho, and Myoung Nam Kim)

### 요약

본 논문에서는 망막의 전기생리학적 기전을 바탕으로 실제 망막과 유사한 기능 및 응답 특성을 갖는 망막 모델을 제안하였다. 시세포에서 양극세포까지는 기존에 연구된 여러 망막 모델들을 종합하여 모델링하였고, 3 NDP 기전을 이용하여 움직임 정보를 검출한다고 알려져 있는 아마크린세포와 양극세포 터미널에 관한 새로운 모델을 제안하였다. 이 모델의 평가를 위하여, 공간상의 동적 자극과 정지 자극에 대한 응답 특성을 비교 분석을 하였을 뿐만 아니라 자극의 움직임 속도에 따른 특성에 대한 분석도 수행하여 제안한 망막 모델을 검증하였다. 본 연구결과는 움직임 정보를 검출하기 위한 비전 시스템에 대한 인간 시각 시스템의 적용 및 생체에 이식할 수 있는 인공 망막의 개발을 위한 기초 연구에 이용될 수 있을 것이다.

### Abstract

Based on electrophysiological retina mechanism, a retina model is proposed, which has similar response characteristics compared with the real primate retina. Photoreceptors, horizontal cells, and bipolar cells are modeled based on the previously studied retina models. And amacrine cells known to have relation to movements detection, and bipolar cell terminals are newly modeled using 3 NDP mechanism. The proposed model verified by analyzing the spatial response characteristics to stationary and moving stimuli, and characteristics for different speeds. Through this retina model, human vision system could be applied to computer vision systems for movement detection, and it could be the basic research for the implantable artificial retina.

**Keyword** : electrophysiological retina mechanism, 3 NDP, retina model, amacrine cell

\* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

(School of Electronics and Electrical Eng., Kyungpook National University)

\*\* 正會員, 慶北大學校 醫工學教室(교신저자)

(Dept. of Biomedical Eng., School of Medicine, Kyungpook National University)

\*\*\* 正會員, 서울大學校 NBRC

(NBRC, Seoul National University)

接受日: 2001年9月26日, 수정완료일: 2002年10月24日

### I. 서론

본 연구의 궁극적인 목표는 외부 세계에 관한 시각 정보를 뇌로 전달해주는 것이다. 인간의 망막과 뇌의 작용에 의한 시각 시스템은 병렬, 분산형의 정보처리를 이용한 실시간 화상처리라는 점에서 현재의 컴퓨터를 이용한 비전 시스템보다 훨씬 앞서 있다고 할 수 있다. 현재까지 연구된 인공 시각 시스템은 시각장애자인에

개 시각 정보를 제공하는 방법에 따라서 다양하다. 손상된 시세포를 대신하는 인공망막을 이식하여 다음 단계의 세포로 전달하는 방법과 입력 영상 자극을 바로 시신경에 전달하는 방법, 그리고 입력 자극을 바로 뇌의 시각 정보를 담당하는 부분에 전달하는 방법이 연구되고 있다<sup>11,12</sup>. 그러나 현재까지 연구된 결과는 단순한 사물을 인식하는 정도의 수준이다. 따라서 이를 극복하기 위해서는 망막에서 시신경까지의 신호 전달에 관한 연구가 선행되어야 하며, 그 중에서 하나의 방법이 망막에 대한 모델링이다. 지금까지 많은 형태의 망막 모델들이 제안되어져 왔는데, 대부분은 망막의 특징적인 기능만을 일반화하여 제안된 모델들로 이러한 모델은 비전 시스템에는 응용할 수는 있으나, 인공 시각 시스템에 적용하는데는 어려움이 있다<sup>13-15</sup>. 반면 Richter와 Teeters 그리고 Shah 등은 망막을 구성하는 각 세포들의 응답이 생체 망막에서의 응답과 유사한 응답이 나올 수 있도록 모델링을 시도하였다. Richter는 이들 중에서 가장 먼저 이러한 망막 모델을 제안하였다<sup>16</sup>. 그러나 그는 각 망막 세포의 시간적 응답 특성을 모델링하였다. Teeters는 망막의 시간 응답뿐만 아니라 공간상의 응답 특성과 움직임 자극에 대한 응답 특성을 보여주고 있다<sup>17</sup>. 하지만, 실시간 처리를 위하여 각 세포의 응답을 단순화하여 실제 세포의 응답과는 차이가 있었다. Shah는 망막의 압축기전과 적응 기전을 포함시켜서 모델링을 시도하여, 시공간적 응답 특성을 모델링하였다<sup>18</sup>. 이 모델은 많은 망막 기전을 포함하고 있으나, 움직임 자극에 대한 응답 특성을 모델링하지는 못하였다.

본 논문에서는 시세포에서부터 아마크린세포의 영향을 고려한 양극세포의 터미널까지의 망막기전을 모델링하였으며, 각 세포들의 시공간적 특성을 분석하였다. 비교적 많이 알려진 시세포, 수평세포, 양극세포는 기존의 연구자들에 의해 연구된 여러 망막 모델들을 종합하여 모델링을 한 후, 각 세포 모델의 평가를 위하여 각 세포의 시간적 응답과 생체 망막 신호의 응답 특성을 비교 분석하였다. 또한 양극세포와 신경절세포 사이에 존재하는 아마크린세포는 망막에서 움직임 정보를 검출하는 역할을 한다고 알려져 있는데, 이를 Roska에 의하여 밝혀진 기전을 바탕으로 모델링을 한 후, 망막 모델의 평가를 위하여, 공간상의 동적 자극과 정지 자극에 대한 응답 특성을 비교 분석을 하였을 뿐만 아니라 자극의 움직임 속도에 따른 특성에 대한 분석도 수

행하여 제안한 망막 모델을 검증하였다.

## II. 망막의 구조와 망막 모델

포유류의 망막은 <그림 1>에서와 같이 대체적으로 3개의 세포층과 2개의 시냅스 연결층의 구조로 되어 있고 이들 속에는 주로 5가지의 기본적인 세포로 구성되어 있다. 시세포(photoreceptor), 수평세포(horizontal cell), 양극세포(bipolar cell), 아마크린세포(amacrine cell), 신경절세포(ganglion cell). 투명한 망막을 통하여 눈으로 들어온 빛은 망막의 맨 뒷부분에 있는 시세포에서 전기신호로 변환된다. 이 변환된 신호는 신경전달 물질(neurotransmitter)에 의하여 각 단계의 망막 세포들에게로 전달되고, 신경절세포에서 스파이크 신호로 변환되어 시신경을 통하여 뇌로 전달된다<sup>11</sup>.

### 1. 망막의 시공간적 신호 전달 모델

망막의 각 세포들의 신호들은 시냅스를 통하여 서로 상호작용을 하는데, 그 중에 동일한 세포 사이에 공간적으로 상호작용을 하는 기능을 세포 결합(cell coupling)이라고 한다. 동일한 세포들 사이에서의 이러한 영향은 바로 인접한 세포에 가장 큰 영향을 미치고 거리가 멀어질수록 가우스분포의 형태로 영향이 감소된다<sup>16</sup>. 망막에서의 신호 전달은 활동 전압(action

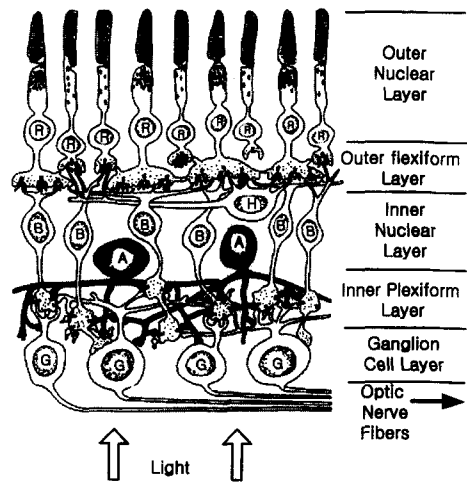


그림 1. 망막의 구조도: R은 시세포, H는 수평세포, B는 양극세포, A는 아마크린세포, 그리고 G는 신경절세포.

Fig. 1. The structure of retina: R is receptor, H is horizontal cell, B is bipolar cell, A is amacrine cell, and G is ganglion cell.

potential)과는 달리 경사 전압(graded potential)으로 전달되기 때문에 시간  $t$  가 지나면 자연 감쇠가 되는데, 이것은 시간적으로 지수적 감소 함수로써 표현이 가능하고 감쇠속도는 시간 상수  $\tau$  에 의하여 결정된다<sup>[6, 11]</sup>. 이와 같은 망막세포들에서 이루어지는 시공간적 신호 전달 특성을 식 (1)의 함수로써 모델링하였다.

$$diffuse(x, y, t; \sigma, \tau) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi\sigma^2\tau} \exp\left(-\frac{|x-i|^2+|y-j|^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), & \text{if } t > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $(x, y)$ 는 측정하고자 하는 공간상 위치  
 $(i, j)$ 는 임의의 공간상 좌표

2 원추세포

망막에서 자극을 받아들이는 부분인 시세포는 간상세포(rod cell)와 원추세포(cone cell)로 구성되는데, 간상세포는 어두운 광 자극에 응답을 보이나, 밝은 광 자극에서는 포화가 되어 그 기능을 할 수 없다. 반면에 원추세포는 일상적인 밝기의 광 자극을 받아들여 그 신호를 전달하기 때문에 본 논문에서는 원추세포만을 고려하였다. 만약 하나의 원추세포로 임펄스 자극을 입력으로 받아들인다면, 원추세포들의 세포 결합과 신호의 시간적 감쇠로 인하여 자극에 대한 응답은 공간적으로 가우스 분포로 퍼져나가고, 시간적으로는 지수적인 감소를 하게된다. 그러므로 원추세포는 식 (1)의 임펄스 응답 시스템을 기본적으로 가진다. 원추세포의 시공간적으로 퍼져나가는 비율은 시간상수  $\tau_{cone}$ 와 공간상수  $\sigma_{cone}$ 에 의해서 결정되는데, 기존의 생리학적 연구에 기반을 두고 제안된 원추세포의 시간상수는 10ms로 설정하였고, 공간상수는 주위의 밝기에 따라서 변하나, 1000 troland이상의 밝기에서 원추세포 크기의 1.5배로 설정하였다<sup>[6, 8, 12]</sup>. 연속적인 입력 자극이 들어올 경우 응답은 각각의 임펄스 응답을 상승적분(convolution)함으로써 얻을 수 있게 된다. 이 상승적분은 입력에 대하여 지역 통과 필터의 기능을 수행하게 되고, 이는 광자극이 망막에 들어올 때 잡음을 제거하는 기능을 수행하게 된다. 시공간적으로 퍼져나간 원추세포의 출력은 수평세포와 양극세포로 보내어지고, 이 중 수평세포로의 출력은 다시 원추세포로 피드백 되어 되돌아온다. 이 피드백을 통하여 원추세포는 넓은 범위의 입력 자극 강도에 대하여 적응을 하게 되어, 다양한 밝기의 입

력 자극에 대하여 포화가 되지 않고 동작을 할 수 있게 된다<sup>[11]</sup>. 그리고 공간상에서 원추세포의 배치는 모델의 단순화를 위하여 정방격자 형태로 배치하였다. 그리고 외부 자극의 증가에 대하여 실제 원추세포와 수평세포는 그 값이 적어지는 탈분극(hyperpolarization)을 일으키게 된다. 제안한 본 모델에서는 편의상 원추세포와 수평세포의 자극에 대한 극성을 바꾸어 자극의 증가에 대하여 세포의 출력도 증가하게 되는 재분극(depolarization)으로 모델링을 하였고, 실제의 응답을 알려고 하면 단지 그 극성을 바꾸기만 하면 된다. 따라서 원추세포의 출력은 다음의 식(2)와 같다.

$$cone(x, y, t) = I(x, y, t) * diffuse(x, y, t; \sigma_{cone}, \tau_{cone}) - k_{nc} horz(x, y, t) \quad (2)$$

여기서,  $I(x,y,t)$ 는 광자극 신호원

$k_{nc}$ 는 가중치 상수

3. 수평세포

수평세포는 수용야(receptive field) 내에 있는 많은 원추세포로부터 입력을 받아들이고, 이 신호들이 원추세포에서와 같이 시공간적으로 퍼져나가게 된다. 수평세포의 공간상수  $\sigma_{horz}$ 는 망막의 양극세포와 신경절세포에서 관찰되는 중심-주변 수용야(center-surround receptive field) 구조로부터 유추하여 설정할 수 있다<sup>[12]</sup>. 원추세포의 입력범위와 수평세포의 입력범위의 직경의 비율은 포유류에서 1:3에서 1:10정도라고 알려져 있는데, 본 논문에서는 1:5로 설정하였다<sup>[13]</sup>. 그리고, 수평세포의 공간상의 배치는 원추세포와 동일하게 설정하였다. 수평세포의 시간상수는 원추세포의 2-3배정도 크다고 알려져 있는데, 본 모델에서의 수평세포의 시간상수  $\tau_{horz}$ 는 20ms로 설정하였다<sup>[6]</sup>. 따라서 수평세포의 출력은 다음의 식(3)과 같다

$$horz(x, y, t) = cone(x, y, t) * diffuse(x, y, t; \sigma_{horz}, \tau_{horz}) \quad (3)$$

4. 양극세포

양극세포는 시세포로부터 중심부의 입력을 받고, 수평세포로부터 주변부 입력을 받아서 가우스-미분(DOG : Difference of Gaussian) 연산( $diff(x, y, t)$ )을 수행하는데, 수평세포의 입력은 경로상의 시간지연을 가진다<sup>[6, 9]</sup>. 이를 통하여 양극세포를 통과한 입력 신호는 가장자리

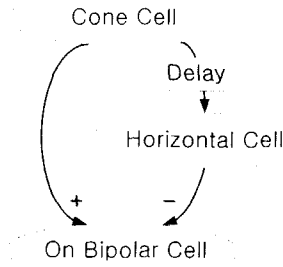


그림 2. 양극세포의 구조도  
Fig. 2. Bipolar cell schematic.

검출의 기능을 수행하게 된다. 이 신호는 식 (5)에서와 같이 포화 비선형 함수를 거치게 되는데, 이는 양극세포의 응답 이득이 매우 크고, 매우 좁은 영역의 동작 영역을 가지고 있다는 것을 모델링한 것이다. 이어서 시간적으로 저역 통과 필터를 통과하여 양극세포의 세포체 출력( $bipolar(x, y, t)$ )을 이루게 된다. 제안된 모델의 양극세포는 여러 개의 원추세포와 수평세포로부터 입력을 받아들여서 넓은 중심 입력 영역과 주변 입력 영역을 가지게 되는데, 이는 아마크린세포의 영향을 받는 양극세포의 형태학적 특성에 기인한다<sup>[8, 13]</sup>. 양극세포는 응답의 특성에 따라서 On 양극세포와 Off 양극세포로 분류가 가능하며, 이는 중심부의 입력이 주변부보다 클 때의 응답이 재분극을 하느냐 탈분극을 하느냐에 따른 것으로, 단지 양극세포의 응답의 극성이 바뀌는 차이만 있으므로, 제안한 양극세포의 함수에서는 On 양극세포의 기전만을 반영하였다.

$$diff(x, y, t) = \sum_3 k_{cb} cone(x, y, t) - \sum_3 k_{hb} horz(x, y, t_{delay}) \quad (4)$$

$$bipolar(x, y, t) = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{diff(x, y, t) * diffuse(x, y, t; 0, \tau_{bipolar})}{k_b} \right) \quad (5)$$

여기서,  $k_{cb}, k_{hb}$  : 가중치 상수

$k_b$  : 포화 비선형 함수의 기울기 상수

$t_{delay}$  : 수평세포의 지연상수

### 5. 아마크린세포

아마크린세포는 양극세포와 신경절세포 사이에 위치하면서 이들 사이에서 다양한 연결 구조와 형태를 가지고 있는데, 이러한 다양성이 망막의 다양한 정보처리

기능에 기여한다고 추측되어지며, 그 중 밝혀진 기능의 하나가 움직임 검출 기능이다<sup>[14]</sup>. 아마크린세포는 크게 지속적인 성질(sustained property)을 가진 것과 일시적인 성질(transient property)을 가진 것으로 나누어지는데, 이 중에서 일시적인 아마크린세포가 동적 자극에 잘 반응한다고 알려져 있다<sup>[14]</sup>. 하지만, Teeters의 모델에서는 지속적인 아마크린 세포가 양극세포 터미널에 양극 세포의 출력에 시간 지연을 가지고 억제 신호로써 작용함으로써 움직임을 검출할 수 있다고 하였고, 일시적인 아마크린세포의 양극세포의 터미널로의 억제 작용에 대한 모델링은 이루어지지 않았다. 하지만 Roska는 1998년에 양극세포 터미널과 일시적인 아마크린세포, 지속적인 아마크린세포는 3NDP(3 neuron disinhibitory pathways)에 의해서 좀 더 복잡한 경로를 통하여 서로 상호 작용을 한다는 사실을 발표하였다<sup>[10]</sup>. 이 과정을 요약해 보면, <그림 3>에서 보는 바와 같이 양극세포의 터미널의 응답이 지속적인 성질과 일시적인 성질의 아마크린세포 모두에게 입력으로 작용을 한다. 하지만 지속적인 아마크린세포보다 일시적인 아마크린세포의 응답이 훨씬 빠르기 때문에 지속적인 아마크린세포가 양극세포 터미널을 억제하기 이전에 일시적인 아마크린세포에 의하여 억제를 받게 된다. 이후 지속적인 성질의 아마크린 세포가 일시적인 성질의 아마크린 세포와 양극세포 터미널을 억제함으로써 일시적인 성질의 아마크린 세포는 더 이상 지속적인 아마크린세포를 억제하지 못하게 되고, 양극세포 터미널에서는 억제 신호를 받아서 그 응답이 급격히 줄어들게 된다고 하였다. 이를 통하여 궁극적으로 양극세포의 터미널에서는 일시적인 아마크린세포의 영향으로 인하여 응답 시간이 지연되게 되는 것이다. Roska는 tiger salamander의 망막을 이용한 실험에서 이 사실을 밝혔으며, 일시적인 아마크린세포의 영향의 유무에 따라서 지속적인 아마크린세포의 응답이 약 120ms 정도의 시간 지연이 일어난다고 한다. 본 논문에서 포유류의 망막을 기준으로 모델링을 하였기 때문에 양서류의 시간지연의 약 10분의 1인 10ms의 시간 지연이 일시적인 아마크린세포에 의하여 발생한다고 모델링하였다<sup>[6]</sup>. 이것은 Teeters에 의한 기존의 모델링에 비해서 훨씬 큰 시간 지연이 발생한다는 것을 알 수 있다. 그리고 아마크린 세포의 시상수  $\tau_{ama}$ 는 dyad에 의해서 직접적으로 상호 작용을 하기 때문에 아주 짧게 설정하였다<sup>[9]</sup>.

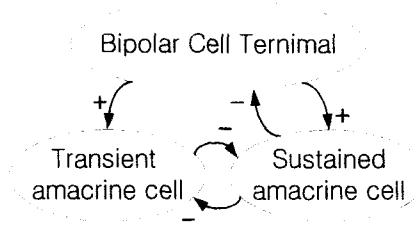


그림 3. 아마크린세포와 양극세포간의 연결을 보여주는 구조도  
 Fig. 3. A schematic of bipolar terminals which show the connection with amacrine cells.

$$s\_ama(x, y, t) = bipolar(x, y, t_{delay}) * diffuse(x, y, t; \sigma_{ama}, \tau_{ama}) \quad (6)$$

6. 양극세포의 터미널

양극세포 터미널에서는 아마크린세포와 신경절세포와 연결되어 있는데, 그 구조의 다양성으로 인하여 다양한 정보를 출력할 것으로 예상된다. 제안한 모델에서는 아마크린세포의 응답과 양극세포의 세포체 출력의 연산으로 움직임 정보를 얻도록 모델링하였다. 하나의 양극세포의 세포체에서 양극세포 터미널로 전달되는 신호는 양극 세포의 세포체 신호가 그대로 전달되고, 지속적인 아마크린 세포로부터 전달되는 억제 신호는 3NDP에 의한 경로 상의 시간지연을 가지게 된다. 이러한 두 입력 신호의 시간적 차이에 의하여 고역 통과 필터 기능을 수행하게 되고 궁극적으로 움직임 성분이 있을 때, 양극세포의 터미널에 출력 성분이 생성되어 움직임 감지 기능을 수행할 수 있게 된다. 또한 양극세포의 터미널에서의 출력이 양의 출력에 비해서 음의 출력이 상대적으로 감소하게 되는 정류(rectification)작용을 모델링함으로써 움직임 자극이 시작되는 부분에서만 출력이 나오도록 하였는데, 이 정류작용은 양극세포 터미널의 중간 출력  $Tb\_temp(x, y, t)$ 의 값이 양일 경우와 음일 경우에 포화 비선형 함수의 기울기 상수  $k_{bt}$ 를 달리 설정함으로써 모델링 하였다.

$$Tb\_temp(x, y, t) = (bipolar(x, y, t) - k_{abs\_ama}(x, y, t)) * diffuse(x, y, t; 0, \tau_{temp})$$

$$T\_bipolar(x, y, t) = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{Tb\_temp(x, y, t)}{k_{bt1}} \right), \text{ if } Tb\_temp > 0$$

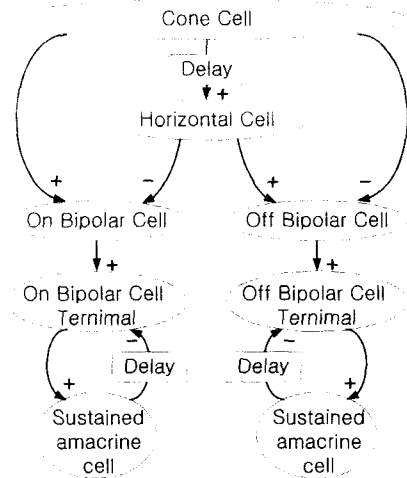


그림 4. 제안된 망막 모델의 구조  
 Fig. 4. Proposed retina model structure.

$$T\_bipolar(x, y, t) = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{Tb\_temp(x, y, t)}{k_{bt2}} \right), \text{ if } Tb\_temp < 0 \quad (7)$$

여기서,  $k_{abs}$  : 가중치 상수,  
 $k_{bt1}$  : 입력이 양일 경우의 포화 비선형 함수의 기울기 상수  
 $k_{bt2}$  : 입력이 음일 경우의 포화 비선형 함수의 기울기 상수

제안한 전체 망막 모델을 <그림 4>의 구조도로 나타내었는데, 위에서 언급한 부분은 On 자극에 반응하는 재분극 양극세포 부분을 모델링한 것이다. 반면 Off 자극에 반응하는 탈분극 양극세포의 부분은 원추세포와 수평세포의 극성을 바꿈으로써 구현이 가능하다.

III. 실험 결과

제안한 망막 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 상에서 사용된 입력 자극 영상의 각 픽셀은 255의 명암레벨을 갖도록 하였다. 하지만 망막은 외부 자극의 크기의 로그 스케일에 비례하여 그 밝기를 인지하고 또한 동작 범위가 넓기 때문에 이 값으로는 적절한 자극 입력을 줄 수 없다. 따라서 시뮬레이션 모델에 들어가는 입력은 각 픽셀의 지수 값을 갖도록 함으로써 모델 입력으로 0에서 약 10의 6승까지

의 값들을 표현하도록 하였다. 그리고, 입력 자극의 단위는 troland ( $\text{candela/m}^2 \times \text{동공의 크기}[\text{mm}^2]$ )를 사용하였다. 이러한 입력 자극을 사용하여 제안된 망막 모델의 시간적 응답이 실제 망막 모델의 응답 특성을 얼마나 잘 반영하는지에 대한 검증을 위하여 전역 광(full field flash) 자극 입력에 대한 실험을 수행하였고, 공간상의 응답특성을 분석하기 위하여 정지 자극과 동적 자극에 대한 공간 응답 특성을 확인하는 실험을 수행하였다. 그리고, 실제 망막의 위치에 따라서 각 세포층의 세포수와 세포의 분포가 다르지만 본 모델에서는 각 층의 세포들이 정방격자형의 배열을 이룬다고 가정하였고, 또한 각 세포층의 세포수도 동일하다고 가정하였다.

1. 각 세포층의 자극의 밝기에 따른 응답

전역 광(full field flash) 자극 입력에 대한 실험을 통하여 모델에 의한 응답과 기존의 각 세포에서 응답 특성을 비교하여 보았다. 시물레이션에서 배경광의 밝기는 3 log troland로 설정하였고, 이러한 배경 광에 적용된 상태에서 1.5에서부터 4.5 log troland까지 0.5 log troland씩 차이가 나는 자극을 200msec동안 자극을 준 후, 그 전후의 응답 파형을 관찰하였다. <그림 5>는 원추세포의 응답을 보여주고 있다. <그림 5(a)>는 Necturus의 망막에 5.5 log troland의 배경 광에 3.5에서 8.0까지의 전역 자극광을 입력하였을 때, 원추세포의

응답을 나타낸 것이고, <그림 5(b)>는 제안한 모델에서의 원추세포에 대한 시물레이션 결과이다.

시물레이션의 결과 중에서 원추세포와 수평세포의 응답은 외부의 밝은 자극에 대하여 탈분극하지만 시물레이션 상에서의 시각적 이해를 돕기 위하여 그 극성을 바꾸어 표시하였다. 이것은 이 두 세포의 응답이 양극세포의 입력으로 사용될 때 다시 극성을 바꾸어 주면 응답의 결과는 동일해진다. 원추세포의 시물레이션의 결과를 보면, 자극광이 밝아짐에 따라서 응답이 커지고 어두워지면 응답이 작아지는데 입력광에 선형적으로 비례하지는 않고 있다. 이것은 인접한 원추세포와 수평세포의 피드백에 의해서 자극의 크기가 커짐에 따라서 포화가 되지 않게 비선형 응답 특성을 보이기 때문인데, Necturus의 응답도 유사한 응답 특성을 보인다. 그리고, 자극이 시작되는 지점과 끝나는 지점에서 과응답(overshoot)이 발생하는데 이는 수평세포의 피드백이 시간지연을 동반하기 때문에 발생되며 Necturus의 응답에서는 약물로 수평세포의 피드백을 억제한 응답 파형이므로 과응답 현상이 나타나지 않는다<sup>[15]</sup>.

<그림 6>은 전역광 자극에 대한 수평세포의 응답인데, <그림 6(a)>는 mudpuppy의 수평세포 응답을 보여주고 있고 <그림 6(b)>는 수평세포의 시물레이션 응답이다. 두 결과 모두 <그림 5>의 원추세포의 응답에 비해서 응답 속도가 느린 것을 확인할 수 있다.

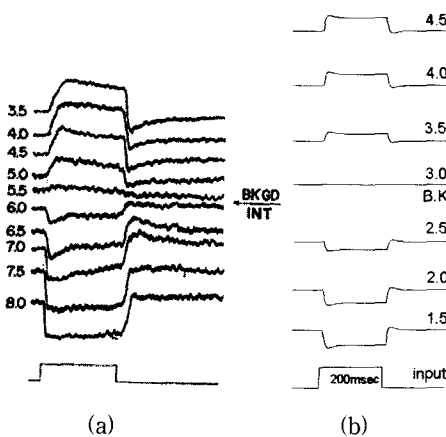


그림 5. 전역 광 자극에 대한 원추세포의 시간 응답 : (a) Necturus 망막의 원추세포 응답<sup>[15]</sup>, (b) 망막 모델에 의한 원추세포 응답

Fig. 5. Cone temporal response to full field flashes : (a) cone response of Necturus retina<sup>[15]</sup>, (b) temporal response of model cone cells.

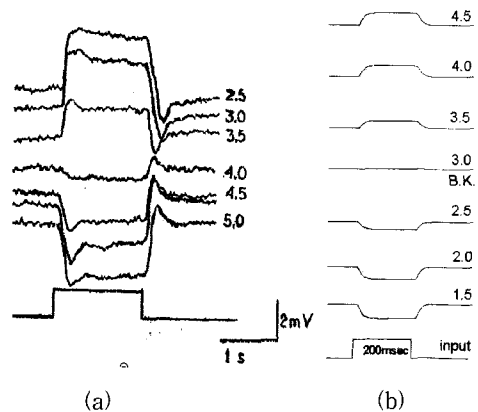


그림 6. 전역 광 자극에 대한 수평세포의 시간 응답 : (a) mudpuppy의 수평세포 응답<sup>[16]</sup>. (b) 망막 모델에 의한 수평세포 응답

Fig. 6. Horizontal cell response to full field flashes : (a) horizontal cell response of mudpuppy retina<sup>[16]</sup>, (b) temporal response of model horizontal cells.

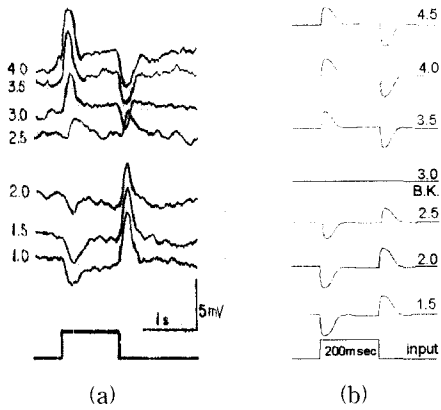


그림 7. 전역 광 자극에 대한 On 양극세포의 시간 응답: (a) 도롱뇽의 양극세포 응답<sup>[16]</sup>, (b) 망막 모델에 의한 양극세포 응답

Fig. 7. On bipolar cell response to full field flashes: (a) bipolar cell response of mudpuppy retina<sup>[16]</sup>, (b) temporal response of model bipolar cells.

<그림 7(a)>의 결과는 mudpuppy의 망막을 이용하여 전역 광자극을 0.9초 동안 주었을 때 양극세포의 응답을 나타낸 것이다<sup>[16]</sup>. 배경광의 강도는 2.5 log troland 이고, 자극의 강도를 달리하며 실험을 수행했을 때의 결과를 보여주고 있다. <그림 7(b)>는 제안된 모델을 이용하여 양극세포의 응답을 구한 결과이다. 두 경우 모두 자극의 시작부분에서 재분극(depolarization)이 일어났고, 자극이 끝나는 부분에서는 탈분극(hyperpolarization)이 일어남을 관찰할 수 있다.

mudpuppy의 양극세포의 응답에서 자극의 크기 강도가 커짐에 따라서 응답이 커지지만 응답의 최고치는 자극 강도에 선형적으로 비례하지 않는다. 이것은 모델에서는 식 (6)과 같은 포화 비선형 함수로써 표현하여 <그림 7(b)>와 같은 시뮬레이션 응답을 구하였다. 위와 같은 망막의 기본 세포인 시세포, 수평세포, 양극세포의 응답이 실제 망막의 특성을 유사하게 따름을 확인할 수 있다.

2. 정적 자극과 동적 자극 응답의 비교

<그림 8>은 공간상의 정적 자극과 움직임 자극이 주어졌을 때, 각 세포층(입력(a), 원추세포(b)-(d), 수평세포(e)-(g), 양극세포 (h)-(j), 지속적인 성질의 아마크린 세포(k)-(m), 양극세포의 터미널(n)-(p))에서의 응답 결과를 3차원적으로 보여주고 있다. 입력자극은 50×200 픽셀의 2차원적인 자극을 주었고, 배경 강도는 2 log

troland이고, 자극의 크기는 20×100픽셀의 크기이고, 자극 강도는 6 log troland로 하였다. 그리고 각 응답 그래프의 왼쪽 윗부분에는 각 공간응답의 중심 단면의 응답을 표현하고 있다. <그림 8>의 왼쪽 그림은 정지 자극을 입력으로 받아들여 안정화된 후의 응답이다. 중간 그림은 왼쪽에서 오른쪽으로 움직이는 자극이 왼쪽의 정지자극과 동일한 위치에 도달했을 때의 On 양극세포를 통한 응답이고, 움직이는 속도는 1 pixel/msec로 하였다. 오른쪽 그림은 위와 동일한 움직이는 자극에 대한 응답 중에서 Off 양극세포에 대한 응답이다. 정지자극에 대한 원추세포의 응답인 <그림 8(b)>는 입력자극이 수용야(receptive field)를 통하여 약간의 퍼짐 현상을 보여주고 있다. 이것은 원추세포 사이의 커플링과 수평세포의 피드백에 의해서 인접한 곳에 위치한 세포의 영향을 받기 때문이다. 움직이는 자극에 대한 원추세포의 응답인 <그림 8(c), (d)>는 정지 자극과 동일한 퍼짐 현상을 보이면서, 자극이 시작되는 부분인 자극의 오른쪽 면에서는 완만한 응답의 증가를 보여주고 있고, 자극이 끝나는 부분인 자극의 왼쪽 면에서의 응답은 끌리는 현상을 보여주고 있다. 이는 자극에 대한 원추세포의 시간 응답 특성과 시간 지연을 가지는 수평세포의 피드백 때문에 나타난다. 원추세포의 입력을 받는 수평세포의 응답인 <그림 8(e)>는 원추세포의 응답에 비해서 퍼짐 현상이 더욱 심해지는데, 이것은 수평세포의 수용야가 원추세포의 수용야보다 훨씬 크기 때문이다. 그리고 동적자극에 대한 수평세포의 응답인 <그림 8(f), (g)>는 자극이 시작되는 부분과 끝나는 부분에서는 원추세포보다 시간 응답 시상수가 크기 때문에 보다 큰 응답 시간 지연을 보여주고 있다. 정지자극에 대한 양극세포의 응답 인 <그림 8(h)>는 중심 입력으로 원추세포의 입력을 가지고 주변 입력으로 수평세포의 입력을 받아들여서 그 차이를 출력한다. 수평세포에서 원추세포로의 피드백에 의해서 가장자리가 약간 두드러져 보이는데, 이를 통하여 양극세포가 가장자리 정보를 추출하는 기능이 있음을 보인다. 하지만 세포 사이의 커플링에 의해서 경계부분이 불명확해져 있다. 움직임 자극에 대한 양극세포의 On 응답인 <그림 8(i)>는 자극이 새로이 시작되는 부분에서는 원추세포의 응답에 비해서 수평세포의 응답이 지연되어 들어오기 때문에 재분극이 강하게 일어나고, 자극이 끝나는 부분에서는 반대로 원추세포의 응답이 끝난 후에도 수평세포의 응답이 유지되어 강한 탈분극이 일어난다.

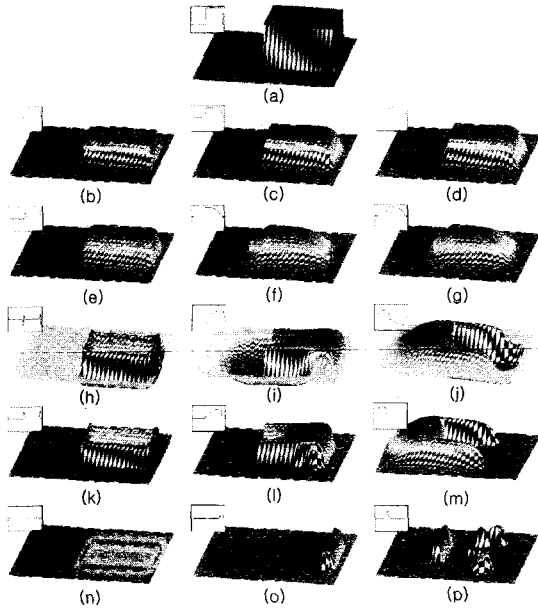


그림 8. 정지 자극과 움직임 자극에 대한 각 세포의 응답; 왼쪽은 정지자극에 대한 각 세포의 응답, 중간은 왼쪽에서 오른쪽으로 움직이는 자극에 대한 on 양극세포를 통한 응답, 오른쪽은 움직이는 자극에 대한 off 양극세포를 통한 응답: (a) 입력 자극, (b)-(d) 원추세포의 응답, (e)-(g) 수평세포의 응답, (h)-(j) 양극세포의 응답, (k)-(m) 지속적인 성질의 아마크린세포의 응답, (n)-(p) 양극세포의 터미널에서의 응답

Fig. 8. Response pattern to stationary and moving squares stimuli; left column is the response of stationary stimuli, center column is the response of the moving stimuli which move left to right through the on-bipolar cells, and right column is the response of the moving stimuli which move left to right through the off-bipolar cells: (a) the input stimuli, (b)-(d) the cone cell response, (e)-(g) horizontal cell response, (h)-(j) bipolar cell response, (k)-(m) sustained amacrine cell response, (n)-(p) the bipolar terminals response.

지속적인 성질의 아마크린세포의 응답은 양극세포의 응답과 유사하나 3NDP에 의하여 약 10ms의 시간지연을 가지게 된다. 정지자극에 대한 지속적 아마크린세포의 응답인 <그림 8(k)>는 자극의 위치가 동일하기 때문에 양극세포의 응답인 <그림 8(h)>와 거의 동일하게 되고, 동적 자극에 대한 응답인 <그림 8(l), (m)>은 공간상으로 3NDP에 의하여 양극세포의 응답에 비해서

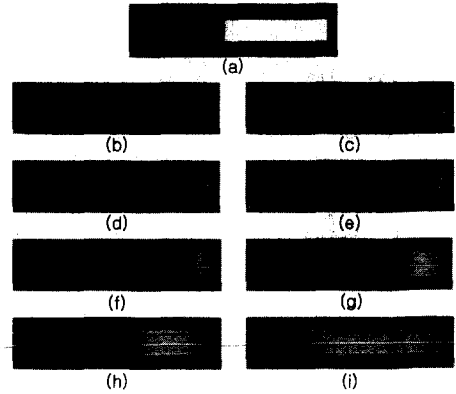


그림 9. 움직임 속도에 따른 양극세포 터미널의 응답: (a) 입력 자극, (b) 1/16 pixel/msec, (c) 1/8 pixel/msec, (d) 1/4 pixel/msec, (e) 1/2 pixel/msec, (f) 1 pixel/msec, (g) 2 pixel/msec, (h) 4 pixel/msec, (i) 8 pixel/msec

Fig. 9. Bipolar cell terminal response at different speeds of the moving stimuli: (a) input stimuli, (b) 1/16 pixel/msec, (c) 1/8 pixel/msec, (d) 1/4 pixel/msec, (e) 1/2 pixel/msec, (f) 1.0 pixel/msec, (g) 2 pixel/msec, (h) 4 pixel/msec, and (i) 8 pixel/msec.

약 10픽셀 왼쪽 부분에서 응답이 나타나고 있다. 또한 정류작용에 의하여 탈분극 응답은 거의 사라져 있다. 최종적으로 양극세포의 끝단인 터미널에서의 출력은 양극세포 세포체에서의 입력에 지속적인 아마크린 세포의 억제 신호의 작용에 의해서 정지자극에 대한 응답인 <그림 8(n)>은 거의 사라졌고, 움직임 자극에 대한 응답인 <그림 8(o)>는 움직임 자극의 시작부분에서 두드러지게 나타나는 반면 그 이외의 부분에서는 강한 억제 신호의 작용에 의해서 응답의 변화가 보이지 않는다. 결론적으로 지속적인 아마크린 기전에 의하여 자극의 움직임 유무를 판별할 수 있을 뿐만 아니라 양극 세포의 출력에 의하여 움직임 자극의 가장자리 정보도 검출할 수 있음을 보인다. Off 양극세포의 응답인 <그림 8(j)>는 On 양극세포의 응답의 극성을 바꾸어 표현이 되었다. Off 양극세포의 출력과 아마크린 세포의 출력인 <그림 8(m)>을 받는 Off 양극세포 터미널의 응답인 <그림 8(p)>에서는 자극이 끝나는 부분에서 큰 응답이 나타남을 볼 수 있다. 더불어 입력 자극의 지속되고 있는 부분인 자극의 위쪽과 아래쪽에서 부분적인 응답이 나타나고 있는데, 이는 지속적인 자극에 의하여 발생하는 초기의 가장자리 검출 능력에 의해서 자극의 아래쪽과 위쪽에 양극세포 터미널의 신호가 발생하지



만 이의 지속에 의하여 새롭게 자극이 시작되는 부분, 즉 아래와 위쪽 가장자리의 오른쪽 부분만 응답이 유지하고 있게 되고 왼쪽 부분에서는 자극의 지속성으로 인하여 양극세포 터미널의 응답이 지속되지 못하기 때문에 발생하는 결과이다. 지금까지의 정지자극과 동적 자극의 On/Off 응답에 의하여 망막의 각 세포층에서의 공간적 응답을 추정하여 정지자극의 양극세포의 응답이 자극의 가장자리를 검출할 수 있음을 보았고, 또한 양극세포 터미널에서 On과 Off 양극세포에 의한 자극이 시작되는 부분과 자극이 끝나는 부분을 검출할 수 있음을 확인하였다. 위의 같이 망막이 움직임 정보를 검출할 수 있음을 보았지만 자극의 움직임 속도에는 제약이 있다. 제안된 모델을 이용하여 속도에 따른 움직임 검출 능력이 <그림 9>에 나타나 있다. <그림 9(f)>는 <그림 8>에서와 동일한 1 pixel/msec의 속도로 움직일 때의 양극세포 터미널의 응답이고, <그림 9(e)~(b)>까지는 이전의 자극의 움직임 속도에 비하여 2분의 1씩 줄어든 때의 공간상 응답 모양이고, 반대로 <그림 9(g)~(i)>까지는 자극의 움직임 속도가 2배씩 증가 할 때의 공간상 응답 모양이다. <그림 9(b)>는 자극이 1/16 pixel/msec의 속도로 움직일 때의 응답인데, 이처럼 속도가 낮을 때는 가장 자리를 정확하게 검출하지만 이 보다 속도가 더욱 낮아지면 입력이 자극이 정지 자극과 유사해져서 정지 자극의 응답에서와 같이 가장자리 정보 자체가 소실될 것이다. 반면 속도가 높아지면 <그림 9(i)>에서와 같이 가장자리 정보가 불명확해지는 것을 보여주고 있으며, 더욱 높아지면 검출이 불가능해질 것이다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 3NDP라는 아마크린세포의 기전을 포함한 새로운 망막 모델을 제안하였고, 이를 컴퓨터로 시뮬레이션을 통하여 각각의 모델링된 세포의 응답이 실제 응답과 유사한 특성을 보이며, 아마크린세포에 의해서 움직임 검출 능력이 있음을 보였다. 아직 움직이는 사물의 전체를 인식하는 완전한 움직임 검출 모델은 아니지만, 인간의 시각 시스템의 특징들을 가지고 있기 때문에 이를 응용하면 개선된 움직임 감지 시스템에 사용할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 시스템의 하드웨어적인 구현은 대용량의 병렬 연산이 필요한데, 이는 병렬로 망막 기능을 수행할 수 있는 칩을 제작함

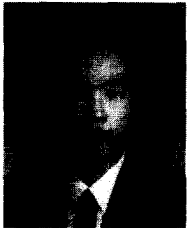
으로써 가능하리라고 본다. 또한, 새로이 제안된 망막 모델의 응답은 생리학적 응답과 유사한 특성을 보이고 있기 때문에 차후에 인간에게 이식할 수 있는 인공 비전 시스템의 기초가 될 수 있을 것이다. 하지만, 본 논문에서는 현재까지 아마크린세포에서 스파이크 생성 기전과 지속적인 성질에 대한 기전이 완벽하게 알려져 있지 않기 때문에 신경질 세포의 출력까지 완벽한 모델링은 수행되지 않았다. 아직 밝혀지지 않은 이러한 망막 기전이 밝혀질 때, 보다 실제 시각 시스템과 유사한 수학적 망막 모델의 제작이 가능하리라고 본다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J.F. Rizzo and J.L. Wyatt, "Prospects for a visual prosthesis," *Neuroscientist*, Vol. 3, pp. 251~262, July 1997.
- [2] D. Marin, M. Troosters, I. Martinez, E. Valderrama, and J. Aguilo, "New developments for high performance implantable stimulators: First 3 Mbps up to 4.46 Mbps demodulator chip through a wireless transcutaneous link," 7th International Conference on Microelectronics for Neural, Fuzzy and Bio-Inspired Systems (MicroNeuro'99) 1999.
- [3] B. J. Seelig and W. Dobbelle, "Altruism, volunteering for artificial vision experimentation and unanticipated psychological," *ASAIO Journal*, Vol. 46, Issue 2, pp. 233, 2000.
- [4] K. Purpura, D. Tranchina, E. Kaplan, and R.M. Hapley, "Light adaptation in the primate retina: analysis of changes in gain and dynamics of monkey retinal ganglion cells," *Visual Neuroscience*, Vol. 4, pp. 75~93, 1990.
- [5] S. Grossberg, "Neural expectation: Cerebellar and retinal analogs of cells fired by learnable or unlearned pattern classes," *Kybernetik*, Vol. 10, pp. 49~57, 1972.
- [6] J. Richter and S. Ullman, "A model for the temporal organization of X- and Y-type receptive fields in the primate retina," *Biological Cybernetics*, Vol. 43, pp. 127~145, 1982.
- [7] J. Teeters, A. Jacobs, and F. Werblin, "How

- neural interactions from neural responses in the salamander retina," *Journal of computational Neuroscience*, Vol. 4, pp. 5~27, 1997.
- [8] S. Shah and M. D. Levin, "Information processing in primate retinal cone pathways: A model," Technical Report CIM-TR-93-19, Center for Intelligent Machines, McGill Univ., 1993.
- [9] D.J. Fleet, P.E. Hallett, and A.D. Jepson. "Spatiotemporal inseparability in early visual processing," *Biological Cybernetics*, Vol. 52, pp. 153~164, 1985.
- [10] B. Roska, E. Németh, and F. S. Werblin, "Response to change is facilitated by a three-neuron disinhibitory pathway in the tiger salamander retina," *Journal of Neuroscience*, Vol. 18, no. 9, pp. 3451~3459, 1998.
- [11] J. E. Dowling, "The RETINA: An approachable part of the brain," Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, pp. 13, 101~116, MA, 1987.
- [12] D. Hubel. "Eye: Brain and Vision," Scientific American Library and W.H. Freeman, New York 1988,
- [13] R.W. Rodieck. "The primate retina," In H.D. Steklis and J. Erwin, editors, *Comparative Primate Biology*, vol. 4 Neurosciences, pages 203~278. Alan R. Liss Inc., New York, NY, 1988.
- [14] F.S. Werblin, "Lateral interactions at inner plexiform layer of vertebrate retina: antagonistic responses to change." *Science*, Vol. 175, pp. 1008~1010, 1972.
- [15] R.A. Normann and F.S. Werblin. "Control of retinal sensitivity I: Light and dark adaptation of vertebrate rods and cones." *Journal of General Physiology*, Vol. 63, pp. 37~61, 1974.
- [16] F.S. Werblin, "Control of retinal sensitivity II: Lateral interactions at the outer plexiform layer," *Journal of General Physiology*, Vol. 63, pp. 62~87, 1974.

## 저 자 소 개



李政祐(正會員)

1995년 2월 : 경북대학교 전자공학과 학사, 1999년 2월 : 경북대학교 전자공학과 석사, 2002년 : 현재 경북대학교 전자공학과 박사과정, <주관심분야 : 생체 모델링, 생체 신호 처리 및 생체 신호 측정 시스템 설계>

템 설계>

蔡承杓(正會員) 第34卷 S編 第5號 參照

현재 : 서울대학교 초미세생체전자시스템연구센터(NBR C) 연구교수

曹辰鎬(正會員) 第38卷 SC編 第1號 參照

金明南(交信著者) 第33卷 B編 第5號 參照

현재 : 경북대학교 의과대학 의공학교실 부교수