

무축삭세포의 기전을 반영한 새로운 계산론적 망막 모델

김명남* · 조진호*.**

* 경북대학교 의과대학 의공학교실 ** 경북대학교 전자전기공학부
(2001년 3월 5일 접수, 2001년 7월 18일 채택)

New Computer Retina Model Reflecting the Mechanism of Amacrine Cell

M.N. Kim* and J.H. Cho**

* Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Kyungpook National University

** School of Electronics and Electrical Engineering, Kyungpook National University

(Received March 5, 2001. Accepted July 18, 2001)

요약 : 본 논문에서는 기존의 계산론적 망막 모델에 일시적인 무축삭세포의 기전을 반영한 새로운 계산론적 망막 모델을 제안하였다. 기존의 계산론적 망막 모델은 생리학적인 데이터로써 성능이 확인된 다른 망막 모델들의 기전을 대부분 반영하였다. 그러나, 이 모델은 광수용기에서 양극세포 까지만 모델링하였으며 움직이는 자극에 반응하는 무축삭세포의 기전을 포함하지 않았다. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위하여 새로이 연구된 일시적인 무축삭세포 및 신경절세포의 계산론적 모델을 기존의 계산론적 모델과 통합한 새로운 계산론적 망막모델을 구성하였다. 고정자극 및 동적 영상 자극에 대한 제안한 모델의 시뮬레이션 결과와 생리학적 데이터와의 비교를 통하여 제안된 새로운 계산론적 망막 모델의 유효성을 확인하였다.

Abstract : In this paper, we have proposed a new computer retina model reflecting the mechanism of transient amacrine cell on the basis of a conventional computer retina model to understand mechanism of visual information processing. The conventional computer retina model contained most of mechanism for other retina models and it was verified with the physiological data. However, we found that a conventional computer retina model doesn't have the mechanism of amacrine cell that was likely to respond to moving stimulus. In proposed model, therefore, a conventional computer model that considered from photoreceptors to bipolar cells and a new computer model that considered for transient amacrine cell and ganglion cell was combined. As we compared the physiological data with the results of computer simulation of transient amacrine cell about fixed stimulus and moving stimulus, we confirmed that the proposed new computer retina model was normally operated.

Key words : Retina, Computer retina model, Visual information, Amacrine cell, Moving stimulus.

서 론

인간시각시스템의 고유한 특성들 중에서 많은 부분들이 입력되는 영상정보들에 대한 망막에서의 반응하는 정도와 획득된 영상정보들을 뇌로 전송하기 전에 신호처리를 하기 위하여 사용되는 방법들에 의해 대부분 제한되어진다. 인공시각시스템도

이와 유사하며 그 특성들도 궁극적으로 센서의 특성들에 의하여 제한되어진다. 망막의 범위 내에서도 인간시각시스템의 능력이 상품화되어 이용할 수 있는 영상 센서들과 인공시각시스템들의 능력보다 훨씬 우수하다는 것이 현재까지 일반적으로 알려져 있다. 따라서, 이러한 사실들이 망막에 대한 연구를 활성화하는 계기가 되고 있으며 이를 위하여 망막 내에서 이루어지고 있는 사물의 인식, 영상 처리 및 획득 기능 등을 분석한 뒤, 이를 통하여 구현된 새로운 계산론적 모델을 다양한 공학적인 응용에 적용하려는 연구가 현재까지 활발히 이루어지고 있다.[1-5] 생체 시각정보처리 기능들은 망막을 포함한 초기 시각계와 대뇌의 시각 영역에 이르는 생체 시각계의 다양한 작용에 기인하는 것으로, 특히 초기 시각계의 망막(retina)에 대한 연구는 시각 정보처리의 규명과 뇌 연구에 있어서 높은

본 연구는 KAIST 뇌과학연구소 뇌정보처리에 기반한 인공 시·청각 시스템 연구(시·청각 신호처리 메커니즘의 이해 위탁연구)지원으로 이루어 졌음.

통신저자 : 김명남, (700-721) 대구광역시 중구 삼덕동 2가 50번지
경북대학교 의과대학 의공학교실
Tel. (053) 420-5266, Fax. (053) 420-5264
E-mail. kimmn@kmu.ac.kr

비중을 차지하고 있다. 따라서 망막의 신호 처리 기전에 대한 심도 있는 연구와 이를 통하여 망막을 전기적, 새로운 계산론적으로 모델링하는 것은 시각 정보 처리 기전을 이해하는 중요한 방법 중의 하나이다. 더 나아가서 이러한 모델들을 실제 생체의 환경과 유사한 자극패턴을 이용하여 검증함으로써 실제 생체의 시각정보처리 시스템과 근접한 망막 모델을 구현할 수 있다. 또한 망막을 모델링함으로써 망막에서 일어나는 시각 신경회로의 처리 기전을 공학적으로도 다양하게 응용할 수도 있다. 망막의 전기적 모델을 응용한 예로서 움직이는 물체를 추적할 수 있는 로봇 시각 시스템의 개발과 새로운 영상 신호 처리 알고리즘의 개발 및 눈의 임상적 진단과 손상된 시력 회복을 위한 인공 망막 보철물(artificial retina prosthesis)의 개발 등에도 사용이 가능하다.[4-5]

따라서 지금까지 많은 연구자들이 망막의 생리학적 기능을 기반으로 하여 다양한 망막모델에 대한 연구를 진행하여 왔다. 최근에 Shah는 기존의 다른 망막 모델들의 기전들을 거의 대부분 집대성하여 계산론적 망막 모델(computer retina model)을 제안하였다.[9] 이 모델은 실제의 망막의 생리학적인 기전을 가장 잘 반영하고 있다. 그러나 이 모델에서는 망막내의 무축삭세포(amacrine cell)에 대한 기전이 반영되지 않음으로써 망막 기전의 가장 중요한 특징 중의 하나인 무축삭세포 기전에 의한 움직이는 자극에 대한 반응 특성을 나타낼 수 없었다. 움직이는 자극에 반응하는 무축삭세포의 기전은 생체 시각계의 가장 큰 기능 중의 하나로서 이를 이용한 다양한 응용이 가능하다. 비록 이러한 기전을 포함한 다른 망막 모델들도 있었지만 이들은 단순화를 위하여 망막의 극히 일부분의 기전만 모델링하여 공학적인 응용에만 치중하였고 실제 움직이는 자극을 이용한 실험 결과를 도출하지는 못하였다.[6-8]

본 논문에서는 생체의 시각정보처리 기전의 이해를 위하여 망막의 생리학적인 기전을 가장 잘 반영하고 있는 Shah[9]의 계산론적 망막 모델을 기반으로 하여 무축삭세포의 기전을 추가한 개선된 망막 모델을 제안하였다. 제안한 모델에서는 양극세포(bipolar cell)까지만 모델링된 기존의 모델에 본 연구를 통하여 개발된 생리학적인 무축삭세포의 기전에 기반한 무축삭세포의 계산론적 모델과 신경절세포(ganglion cell)의 기전에 대한 새로운 모델을 추가하였다. 모의 실험을 통한 실험결과, 자극의 변화에 대한 무축삭세포의 특징인 스파이크 특성을 생체실험 데이터와 비교를 통하여 확인하였으며 움직이는 영상 자극 패턴에 대한 실험을 통하여 무축삭세포 및 신경절세포의 출력을 분석함으로써 제안한 망막 모델이 정상적으로 동작함을 확인하였다.

기존의 계산론적 망막 모델

1. 망막의 생리학적 기전

광선이 눈을 따라 들어가면 1억~2억개로 추산되는 광수용체(photoreceptor cell)에 도착하게 되고, 그런 후에는 색소 상

피(pigment epithelium)에 있는 화학물질들의 반응에 의해 빛 에너지가 전기적 신호로 바뀌게 된다. 바뀐 신호는 망막의 여러 층을 통해 시공간적으로 왜곡이 생기면서 투명한 망막세포들 사이로 거꾸로 퍼져 나간다. 어떤 곳에서는 압축이 행해지고, 다른 곳에서는 다른 많은 신경 신호들을 병렬적으로 전달하기 전에 수십 ms정도의 지연이 생기기도 한다. 이런 신호들은 다른 신경들과의 상호작용에 의해 그 성격이 결정되어지고, 결국은 신경절세포에서 다시 모여져서 시신경 다발을 따라 뇌의 뒤쪽으로 전달된다. 신경절세포까지의 신호 전달은 아날로그 신호와 경사전위(graded potential)를 이용하며 망막의 끝인 신경절세포 말단과 시신경에서는 스파이크 신호를 이용한다.

2. Shah의 계산론적 망막 모델(9)

계산론적 망막 모델은 시각정보가 처리되는 과정을 각 망막 층별로 체계적으로 모델링하였다.

이 망막 모델에 의해 채용된 망막 기전들 중 제안한 모델과 관련되는 광수용체층, 수평세포층(horizontal cell layer), 그리고 midget 양극세포층 및 diffuse 양극세포층에서 발생하는 각 출력을 (1)~(4)식에서 각각 정리하였다.[9] 여기서, $EP_{midget}[r,t]$ 와 $BP_{diffuse}[r,t]$ 는 midget과 diffuse 양극세포의 출력이고, $cone[r,t]$ 와 $horz[r,t]$ 는 추체(cone cell)와 수평세포의 출력이며 $center[r,t]$ 는 중심 출력으로써 9개 추체 출력의 평균이고, $surround[r,t]$ 는 주변 출력으로서 지연된 수평세포 입력으로 연어진다. $BP_{sat}(x)$ 는 대칭적인 양극세포의 포화함수(symmetric bipolar saturation function)이고, $k_{BP_{midget}}$ 와 $k_{BP_{diffuse}}$ 는 응답 대역의 폭을 조정하는 역할을 하며 $K(t; \tau_{midget})$ 와 $K(t; \tau_{diffuse})$ 는 시간적인 저역 통과 필터(temporal lowpass filter)이다. 또한, τ_{midget} 과 $\tau_{diffuse}$ 는 midget과 diffuse 양극세포를 위한 시상수(time constant)이며 k_{cb} 와 k_{hb} 역시 추체와 수평세포에 주어진 증폭인자들과, τ_{delay} 는 중심과 주변간의 약 3ms의 시간지연을 의미한다.

- 수용기 출력 (cone cell output)

$$cone[r, t] = v_r[r, t] * G(r; \sigma_r, t) K(t; \tau_{cone}) - k_{hc} horz[r, t] \quad (1)$$

- 수평세포 출력 (horizontal cell output)

$$horz[r, t] = cone[r, t] * G(r; \sigma_{horz}, t) K(t; \tau_{horz}) \quad (2)$$

- Midget 쌍극세포 출력 (midget bipolar cell output)

$$BP_{midget}[r, t] = BP_{sat}(k_{cb} cone[r, t] - k_{hb} horz[r, t]) * K(t; \tau_{midget})$$

$$\text{where, } BP_{sat}(x) = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{x}{k_{BP_{midget}}} \right) \quad (3)$$

- Diffuse 쌍극세포 출력 (diffuse bipolar cell output)

$$BP_{diffuse}[r, t] = BP_{sat}(k_{cb} center[r, t] - k_{hb} surround[r, t]) * K(t; \tau_{diffuse})$$

$$\text{where, } center[r, t] = \sum_{3 \times 3} cone[r, t]$$

$$surround[r, t] = \sum_{3 \times 3} horz[r, t - \tau_{delay}] * G(r; 3\sigma_{horz}, t)$$

$$BP_{sat}(x) = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{x}{k_{BP_{sat}}} \right) \quad (4)$$

제안한 망막 모델

1. 망막내의 무축삭세포의 기전

무축삭세포의 기전은 정확히는 알려져 있지는 않으나 지금까지 알려진 바로는 그 형태에 의하여 협대역(narrow field) 무축삭세포와 광대역(wide field) 무축삭세포로 분류되며 각각은 지속적(sustained)인 성질과 일시적(transient)인 성질을 가진다고 알려졌다.

두 가지 형태 중에서 일시적인 세포(transient cell)가 더 많이 존재하고 그 기전에 대해서도 더 많이 알려져 있다. 이 세포는 중심-주변 적대 관계(center-surround antagonistic organization)를 보이지 않고, 출력 형태는 대개 한 두개의 스파이크로 나타나며 움직이는 자극에 대하여 민감하게 반응한다. 이에 비해 지속적인 세포(sustained cell)의 출력은 율동스파(oscillatory potential)와 그 위에 스파이크 모양의 반응이 실린 형태를 갖는다. 그리고 지속적인 세포는 일시적인 세포와는 달리 중심-주변 적대 관계를 보이며 응답 특성이 수평세포와 양극세포의 응답 특성과 많이 유사하다.

생물학적인 여러 연구에서 하등의 척추동물에서 나타나는 대부분의 무축삭세포는 일시적인 성질을 보이고, 자신의 수용야 내의 자극광 증가 또는 감소에 대해 짧은 스파이크 형태로 반응을 하는 것으로 보고되어 있다. 자극의 강도와 형태에 관계없이 대부분의 일시적인 세포에서는 일시적 탈분극 전위(transient depolarization potential)상에 하나 혹은 두 개의 스파이크들을 보인다. 자극 강도가 커지면 응답의 크기가 급격히 증가하여 스파이크 현상을 보이고, 자극을 인가한 후 스파이크가 발생하기까지 소요되는 시간인 잠복기도 급격히 짧아진다.[7]

여러 연구에서 보고된 바와 같이 무축삭세포의 응답은 그들

의 해부학적 구조와 많은 관련이 있다.[7,10,11] 일시적인 세포는 양성층 구조(bi-stratified type)를 가지므로 과분극하는 양극세포의 출력과 탈분극하는 양극세포의 출력을 모두 입력으로 받는다. 이 입력들이 무축삭세포에 동시에 들어오고, 크기도 같다면, 서로 상쇄를 일으켜 무축삭세포의 응답은 사라지게 되지만 입력이 동시에 왔다고 해서 동시에 도착되지 않고 두 신호 사이에는 약간의 지연시간이 존재한다.

예를 들어 도롱뇽에서는 양극세포의 탈분극과 재분극 입력 사이의 지연이 약 90 ms 정도이다.[7] 따라서 위의 지연 때문에 결합된 응답이 상쇄되어지지 않는다. 그 외에 무축삭세포는 빛 자극의 증가와 감소 모두에 반응하고 응답의 크기는 자극의 변화율에 의존한다. 즉, 움직이는 영상이 수용야를 지나가면 지나가는 속력에 비례하여 무축삭세포의 응답이 커진다. 충분히 속도가 빨라서 발화 문턱에 도달하게 되면 신경절세포 활동은 급격히 감소하게 된다. 속도가 느리면 발화 문턱에 도달하지 못하여 무축삭세포는 응답하지 않는다. 입력광의 강도가 낮아서 무축삭세포의 출력이 활성화되지 못한다면 신경절세포의 응답은 무축삭세포의 기전으로 발생하는 억제효과가 사라져서 스파이크 형태를 보이지 않고 지속적인 파형을 나타낼 것이다. 즉, 무축삭세포에 의한 가장 큰 효과는 자극의 변화가 충분히 빠르면 신경절세포의 응답에서 스파이크를 만드는 것과 신경절세포의 응답을 제어하는 것이다.

일시적인 세포가 자신의 수용야의 중심 근처의 좁은 영역에서 양극세포 출력의 변화를 감지하여 넓은 지역의 신경절세포에게 억제 신경 전달 물질(inhibitory neurotransmitter)을 분사하는 역할을 하는데 반해, 지속적인 세포는 몇몇 양극세포의 축삭 말단으로 가는 부체환을 통해 자극 영상의 변화를 감지한다. 즉, 지속적인 세포는 시간적으로 고대역 필터의 역할을 하게 된다.[12,13] 또한 지속적인 세포의 응답은 수평세포와 양극세포의 응답과 닮았지만 일시적인 세포는 이와는 전혀 다르다. 하지만 지속적인 세포는 어느 정도 일시적인 세포의 성질을 가지고 있기도 하다. 양극세포와 무축삭세포 및 신경절세포의 연결관계를 그림 1에서 보았다. 그림 1에서 B는 양극세포이며, G는 신경절세포이다. 그리고 SA는 지속적인 특성을 갖는 무축삭세포이고 TA는 일시적인 특성을 갖는 무축삭세포이다.

2. 제안한 무축삭세포에 대한 계산론적 망막 모델

제안된 새로운 망막 모델은 기존의 계산론적 망막 모델에 무축삭세포의 기전을 기반으로 하여 도출한 계산론적 모델을 기존 모델의 형식에 맞추어 재구성하였다. 기존의 모델은 실제 생리학적인 망막의 기전과 가장 유사한 모델 중의 하나라고 알려졌지만, 무축삭세포의 기전을 포함하지 않아 움직이는 자극에 대하여 반응을 나타낼 수가 없었다. 제안된 모델은 기존의 모델과는 달리 고정된 자극의 시작과 끝 지점에서 무축삭세포가 스파이크 형태의 응답을 나타냄으로써 일시적인 무축삭세포의 기전이 정상적으로 동작함을 보여준다. 또한 움직이는 자극을 이용하여 제안된 모델을 검증함으로써 더욱 더 실제 생체 망막 기전과 유사한 모델임을 입증하였다.

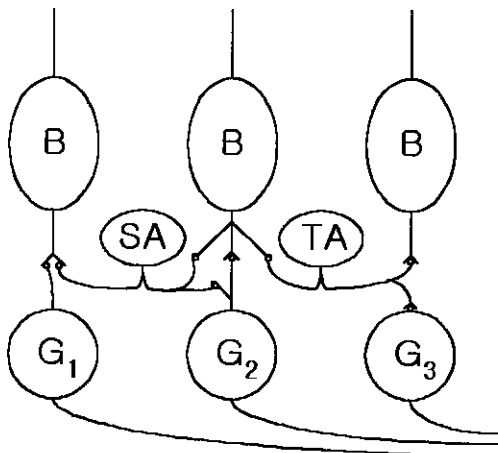


그림 1. 무축삭세포와 망막세포들 사이의 연결 관계
Fig. 1. The relation of connection between amacrine cells and retina cells

제안된 모델은 양극세포 이전의 기전은 계산론적 망막 모델에 기초하였고, 일시적인 무축삭세포와 신경절세포만을 모의 실험하였다. 특히 본 논문에서는 세포의 수도 일시적인 세포보다 적고 훨씬 덜 알려진 지속적인 세포의 기전에 대한 모델을 단순화하기 위하여 앞 절에서 설명한 지속적인 세포에 대한 시간적인 고대역 필터 특성을 양극세포와 일시적인 세포사이의 양극세포 말단부분(dyad)에서 일어나는 유사 미분(derivative like)현상으로 반영하였다.[12,13] 유사 미분 신호는 양극세포의 신호를 시간적으로 미분한 값을 의미하며 이를 형태적으로는 일시적인 무축삭세포에서 양극세포로 되돌아가는 부채환에 의하여 구현하였다.

유사 미분 변조된 신호는 일시적인 세포와 신경절세포 둘 모두에게 입력된다. 이때 일시적인 무축삭세포는 과분극과 탈분극 양극세포 모두, 또는 둘 중의 하나의 입력을 받는다. 둘 다 입력될 경우 일시적인 세포의 응답은 탈분극 입력과 이에 비해 얼마간 지연된 과분극 입력의 합으로써 계산되어질 수 있다. 두 가지 양극세포의 입력을 받은 일시적인 무축삭세포는 문턱화 연산을 거쳐 신경절세포로 억제신호 입력을 준다. 이러한 문턱화 연산은 앞 절에서 언급된 무축삭세포의 발화 문턱에 의한 스파이크 발생 기전을 반영한 것으로 빠르고 강한 입력광에 대한 무축삭세포의 증가하는 반응은 유사미분으로 반영되고 이들 값이 일정한 범위를 넘어섰을 때 무축삭세포는 출력을 발생시키게 됨을 의미한다. 이때 각각의 신호들은 각각의 증폭 인자에 의해 증폭되어진다. 이 증폭 인자들은 실험결과에서 얻어진 것을 그대로 이용하였다. 최종적으로 신경절세포 출력은 여기신호로 입력된 유사 미분 변조를 거친 양극세포 입력과 약간 지연된 억제신호로 입력된 일시적인 무축삭세포의 입력의 차로써 계산되어진다. 이는 앞 절의 신경절세포의 기전에서 설명되어진 내용을 반영한 것으로 양극세포의 말단부위가 유사미분 작용을 가진다는 사실과 신경절세포의 입력에 직접 연결되어 있다는 구조적 특징 및 무축삭세포의 출력이 신경절의 출력을 역으로 제한한다는 사실을 고려한 것이다. 여기에도 역시 각각의 증폭 인자에 의하여 신호들이 증폭되어져서 계산되어진다.

이상의 내용들을 고려하여 제안된 망막모델을 그림 2에 나타내었다. 이 모델은 양극세포까지는 계산론적 모델을 근간으로 하였고, 일시적인 세포와 신경절세포의 출력에 대한 계산론적 모델은 식(5)와 식(6)에서 나타내었다.

- 일시적인 무축삭세포의 출력 (transient amacrine cell output)

$$AC_{transient}(r, t) = TH(k_a BP(r, t) D(t))$$

where, $D(t) = BP(r, t) - BP(r, t-1)$ (5)

- 신경절세포의 출력 (ganglion cell output)

$$GN(r, t) = k_g BP(r, t) D(t) - AC_{transient}(r, t-1) K(t, \tau_{ac})$$
 (6)

여기서, k_a 와 k_g 는 각각 무축삭세포와 신경절세포에 전달되는 양극세포 말단부의 출력값을 조정하기위한 증폭 인자들

(amplification factors)이다. $BP(r,t)$ 는 시간 t 에서 좌표 r 의 위치에 있는 양극세포의 출력(bipolar cell output)이고, $D(t)$ 는 양극세포 말단부에서 일어나는 시간적 변화에 대한 유사 미분 함수(derivative like operation)로써 현재의 양극세포의 출력에서 과거의 양극세포의 출력의 차이이다. 이 함수와 양극세포의 출력 $BP(r,t)$ 를 곱함으로써 유사 미분 변조된 양극세포의 출력이 생성하고 이 신호는 무축삭세포와 신경절세포의 입력이 된다. $TH(\cdot)$ 는 유사 미분 변조된 입력으로 발생하는 무축삭세포의 발화 문턱에 의한 스파이크 발생 기전을 반영하기 위한 문턱치 연산(threshold operation)을 의미한다. $K(t, \tau)$ 는 시간적 저역통과필터(temporal lowpass filter)로써 양극세포의 처리속도가 늦기 때문에 시간지연을 주어 처리속도를 맞추어 주는 역할을 한다.[9]

신경절세포의 출력은 양극세포의 출력으로써 흥분되고 일시

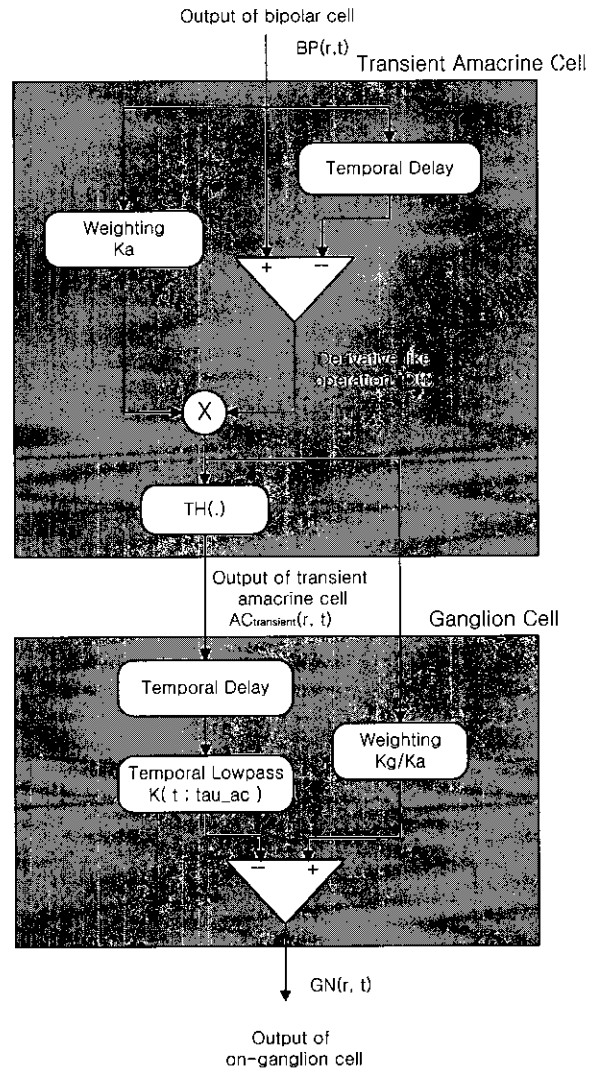


그림 2. 일시적인 무축삭세포의 기전을 반영한 제안된 모델
Fig. 2. Proposed model with mechanism of transient amacrine cell

적인 무축삭세포의 출력으로써 억제되는 기전을 가지고 있다. 따라서, 신경절세포의 출력인 식(6)은 두 개의 항을 가지는데 첫 번째 항은 양극세포의 말단부로부터의 흥분성 입력이며 두 번째 항은 일시적인 무축삭세포에 의한 억제성 입력이다. 제안된 모델과 기존의 모델과의 전체적인 차이점을 비교하기 위하여 두 개의 모델을 비교한 블록도를 그림 3에서 보였다.

실험 결과 및 고찰

제안된 망막 모델의 성능을 평가하기 위하여 임상에서도 많이 사용되고 있는 전조사 고정 광 자극과 움직임에 따른 특성을 확인하기 위하여 고안된 동적 자극을 입력으로 하는 모의 실험을 행하였다. 동적 자극은 밝은 사각형이 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하는 20 프레임의 영상으로 구성하였으며 초기의 일정한 프레임동안은 움직임이 없다 그 이후에 움직이는 형태로 구성하여 무축삭세포의 신경절세포에 대한 억제 신호 현상을 보다 뚜렷하게 관찰할 수 있도록 하였다. 즉, 정지된 자극에 대한 응답에서는 억제 현상을 보이지 않을 것이고 뒤이어나오는 움직이는 자극에 대해서는 억제 현상을 보여줄 것이다. 본 모의 실험에서는 각 뉴런 층간에 1 ms의 시간 지연을 고려하였으며 변수들은 기존의 계산론적 망막 모델에서의 실험치를

그대로 인용하였고 무축삭세포에 대한 변수는 실험적으로 정하였다. 시간적인 저역 통과 필터는 그 식은 모두 유사하지만 각 망막 모델층에 따라 변수의 차이를 두었다.

실제 도롱뇽에서 얻어진 양극세포의 출력과 제안된 모델을 이용하여 모의 실험한 양극세포의 출력을 그림 4에 비교하여 나타내었다. 이때, 그림 4의 (a)는 Dowling에 의해 행해진 도롱뇽 망막에 대한 전조사 고정 광 자극 실험 결과이다.[14] 이 두 개의 파형을 비교해보면 모의 실험된 결과가 실제 측정치와 형태 면에서 매우 유사함을 알 수 있었다.

무축삭세포의 출력은 그림 5에 나타내었다. 그림 5의 (a)는 도롱뇽 망막의 일시적인 세포에서 얻어진 측정치를 나타내며 그림 5의 (b)는 제안한 망막 모델로써 모의 실험한 일시적인 세포의 응답을 나타내었다. 실제 실험에 의한 출력파형과 모의 실험한 일시적인 무축삭세포의 출력파형이 매우 유사함을 보임으로써 제안한 모델에서의 무축삭세포의 기전이 정상적으로 동작함을 알 수 있다.

제안한 모델에서 무축삭세포의 기전이 정상적으로 동작하는지 더 자세히 확인하기 위해서는 움직이는 자극을 이용한 반응 특성을 얻는 것이 필수적이다. 본 논문에서 사용한 움직이는 자극은 연속적인 프레임들로 구성하였다. 그림 6에서 본 모의 실험에 사용된 움직이는 자극을 나타내었다. 하나의 프레임은 100×100 크기의 화소로 하였고, 정지된 자극 보다 동적 자극에 대한 반응이 더 민감한 무축삭세포 기전의 특성을 확인하기 위하여 동적 자극은 초기에는 정지된 자극 프레임이 연속하여 나타나다가 뒤이어 움직이는 자극 프레임이 나타나는 형식으로 구성하였다. 그리고 동적 모의 실험 결과의 타당성을 확인하기 위하여 Jacob 등[6]의 문헌에서 발표된 생리학적인 바탕으로 도출해낸 각 세포들의 예측되는 출력과 제안한 망막 모델에 대한 각 세포들의 모의 실험 결과를 비교하는 방식을 취하였다.

그림 7에는 Jacob 등이 도출해낸 양극세포의 출력과 고안된 자극에 대한 제안된 모델의 양극세포의 출력을 나타내었다. 그림 7의 (a)에 나타나있는 Jacob 등의 양극세포 출력은 먼저, 상단의 첫 번째 프레임의 그림은 고정되어있는 자극을 의미하고, 두 번째 프레임은 막 움직이기 시작할 때의 모습이고, 세 번째 프레임은 움직이고 난 후 1/4 초가 지난 후의 영상을 의미한다. 이러한 자극 영상에 대한 하단의 양극세포의 출력 영상은 밝고 어두움의 경계를 나타낸다고 알려진 양극세포 출력의 특징을 보여주고 있다. 그림 7의 (a)에서 보면 밝은 쪽과 어두운 쪽의 경계면이 전체적으로 회색으로 나타나 있으며 하단 첫 장의 고정된 자극에서는 경계를 비교적 자세히 나타내지만 움직이기 시작하면 할수록 경계면의 범위가 점점 더 넓어짐을 알 수 있다. 모의 실험용 자극 패턴에 대한 제안한 망막 모델의 양극세포 출력을 그림 7의 (b)에서 보였다. 이 결과에서도 고정된 자극과 움직이기 시작할 때에는 비교적 경계를 잘 나타내다가 계속 움직이기 시작하면서 차츰 경계면이 넓어지고 나중에는 경계를 거의 나타내 주지 못함을 볼 수 있다.

기존의 계산론적 모델에서는 양극세포의 출력을 최종 신경

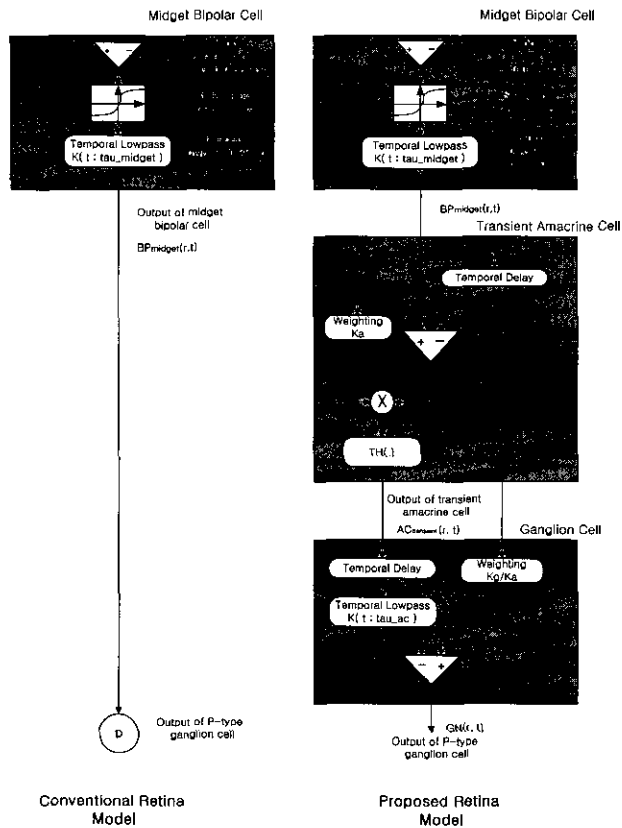


그림 3. 제안된 모델과 기존의 모델에 대한 비교
Fig. 3. Comparison between the proposed model and conventional model

절세포의 출력으로 간주하여 모델을 단순화한 장점은 있었지만 실제의 무축삭세포 및 신경절세포의 기전을 보여주지는 못하였다. 제안된 모델의 일시적인 무축삭세포에 대한 출력은 그림 8에 나타나있다. Jacob 등이 도출해낸 무축삭세포의 출력은 양극세포의 입력을 받아 넓은 범위에 억제신호를 전해주기 위해 자극 영상에 비해 출력 영상이 더 넓게 퍼짐을 알 수 있다. 제안된 모델에서도 자극 영상이 움직이기 시작함에 따라 출력 영상이 Jacob 등의 출력에서와 같이 퍼지는 현상을 보임으로써 일시적인 무축삭세포의 기능이 정상적으로 동작함을 알 수 있었다.

그림 9에서는 주어진 자극패턴에 대한 신경절세포의 출력을 나타내었다. 신경절세포 출력의 특징은 움직이기 시작하는 그 순간에 양극세포 출력의 영향으로 반응을 하다가 움직이기 지속되면 무축삭세포의 넓게 퍼진 억제신호 영향으로 초기의 반응이 사라지게 된다.

Jacob 등이 도출해낸 결과를 보면, 일단 고정된 자극에 대해서는 반응을 나타내지 않다가, 자극이 움직이기 시작하는 그 순간에서는 반응을 보이지만, 일단 움직이기 시작하면 그 반응이 사라지고 무축삭세포와 유사한 반응을 보였다. 제안된 모델의 출력에서도 유사한 특성을 보임으로써 제안된 모델 내의 신경절세포의 기전이 비교적 정확하게 동작하고 있음을 알 수 있었다. 하지만 움직이기 시작될 때 만 나타나야할 반응이 몇 프레임에 걸쳐서 나타나는 현상을 보이는데, 이것은 제안한 모델의 모의 실험에서 각 세포층간의 시간 지연을 1ms로 두어 한 프레임이 지나갈 때마다 한 세포 층의 기전을 완전히 통과한다고 가정하였기 때문에 나타나는 현상이다.

결론

본 논문에서는 생체의 시각정보처리 기전의 이해를 위하여 망막의 생리학적인 기전과 잘 반영하고 있는 기존의 계산론적

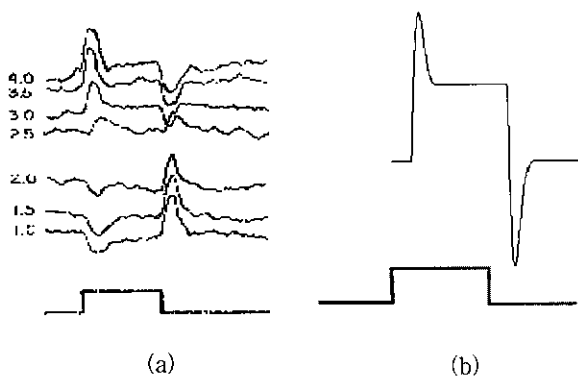


그림 4. 전조사 광 자극에 대한 Midget 양극세포 응답 : (a) 도롱뇽 망막에서의 실제 측정치, (b) 제안한 망막 모델로부터 모의 실험된 결과
 Fig. 4. Midget bipolar cell response to full-field flashes represented at the bottom: (a) recordings from a depolarizing bipolar cell in the mudpuppy retina, and (b) simulated bipolar cell output from proposed retina model.

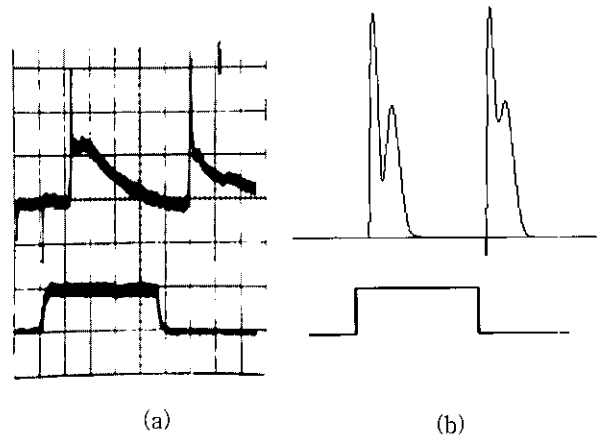


그림 5. 전조사 빛 자극에 대한 일시적 세포의 응답 : (a) Dowling의 실험에서 도롱뇽의 망막에서 측정된 실제 측정치, (b) 제안한 망막 모델로부터 모의 실험한 일시적인 무축삭세포 응답
 Fig. 5. Transient amacrine cell response to full-field flash: (a) recordings from a transient amacrine cell in the mudpuppy retina by Dowling, and (b) simulated transient amacrine cell output from proposed new retina model

망막 모델을 기반으로 하여 일시적인 무축삭세포의 기전을 추가한 개선된 망막 모델을 제안하였다. 제안한 모델에서는 양극세포까지만 모델링된 기존의 모델과 생리학적인 일시적인 무축삭세포의 기전에 기반하여 개발된 일시적인 무축삭세포의 계산론적 모델을 결합하였으며 기존의 모델에서 고려하지 않았던 신경절세포의 기전에 대한 계산론적 모델도 추가하였다. 기존의 계산론적 망막모델은 많은 장점에도 불구하고 무축삭세포의 기전을 생략함으로써 움직이는 자극에 대한 응답을 도출하지 못하였지만, 제안된 모델에서는 무축삭세포의 기전을 포함하여 모델링하였기 때문에 움직이는 자극에도 응답이 가능하도록 하였으며 따라서, 기존의 모델보다 더욱 유사한 실제 생체의 시각 정보 처리 기전을 반영할 수 있었다. 모의 실험결과, 자극의 변화에 대한 일시적인 무축삭세포의 특징인 스파이크 특성을 생체실험 데이터와 비교를 통하여 확인하였으며 또한 움직이는 영상자극 패턴에 대한 실험을 통하여 무축삭세포 및 신

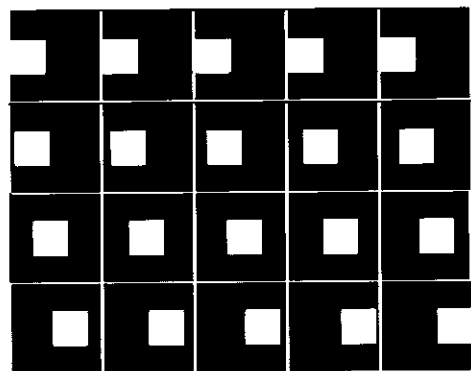


그림 6. 모의 실험에 사용된 자극 패턴
 Fig. 6. Stimulus pattern used in this simulation

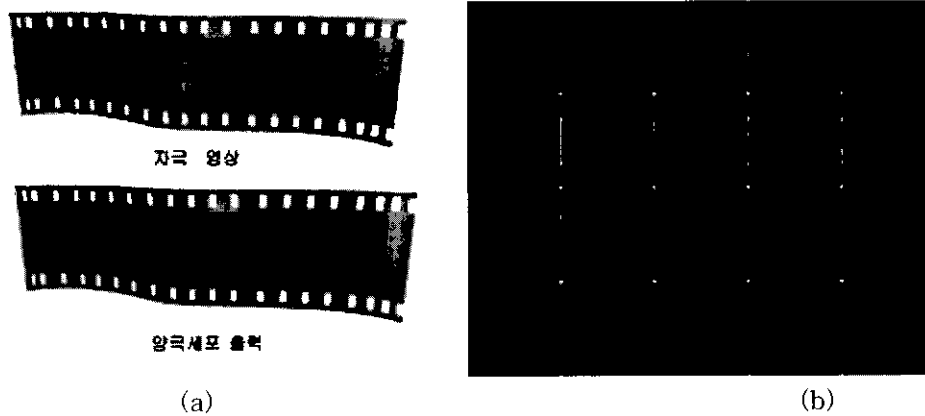


그림 7. (a) Jacob 등의 모델의 양극세포 출력과 (b) 제안한 망막모델의 양극세포 출력의 비교
 Fig. 7. (a) Bipolar cell output of Jacob's model, and (b) bipolar cell output of proposed retina model

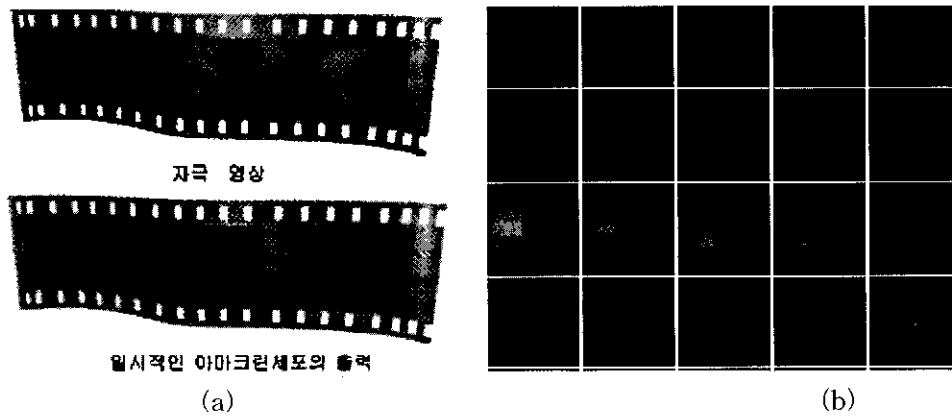


그림 8. (a) Jacob 등의 모델에 나타난 일시적인 무축삭세포의 출력과 (b) 제안된 모델에서의 일시적인 무축삭세포의 출력
 Fig. 8. (a) Transient amacrine cell output of Jacob's model, and (b) transient amacrine cell output of proposed model

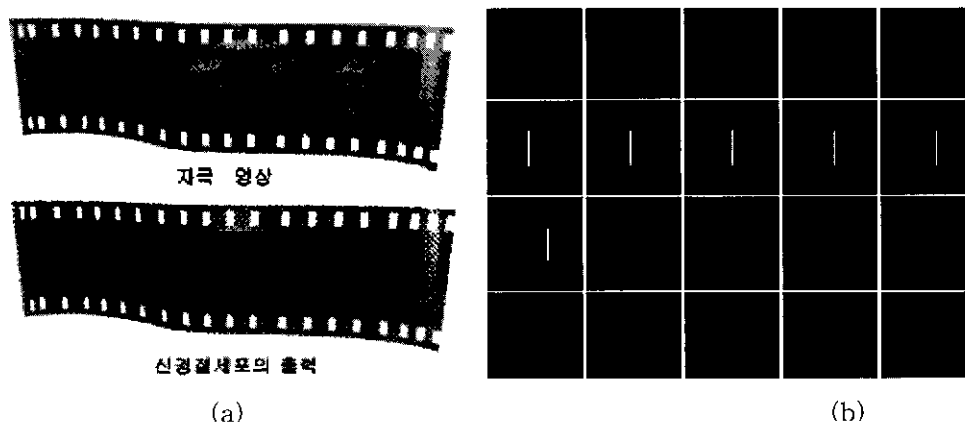


그림 9. (a) Jacob 등의 모델에서의 신경절세포의 출력과 (b) 제안된 모델의 신경절세포의 출력
 Fig. 9. (a) Ganglion cell output of Jacob's model, and (b) ganglion cell output of proposed model

경절세포의 출력을 분석함으로써 제안한 망막 모델이 정상적으로 동작함을 확인하였다.

참고 문헌

1. E. Leclercq, L. Cachard, P. Leber and A. Faure,

- "Tracking a moving stimulus by active vision", SPIE, vol. 3309, pp. 997-1007, 1997
2. T.V. Papathomas, R.S. Kashi and A. Gorea, "A human vision based computational model for chromatic texture segregation", IEEE Trans. on Sys. Man and Cybern. part B, vol. 27. no. 3, pp. 428-440, June 1997
 3. R. Eckmiller, M. Becker and R. Hünemann, "Dialog concepts for learning retina encoders", IEEE Proceedings of the 6th European Congress on Intelligent Techniques & Soft Computing-Volume 3, vol. 3, pp. 1780-1787, 1997
 4. J. Wyatt and J. Rizzo, "Ocular implants for the blind", IEEE Spectrum, pp. 47-53, May 1996
 5. R.A. Normann and E.M. Maynard, "Cortical implants for the blind", IEEE Spectrum, pp. 54-59, May 1996
 6. F.S. Werblin, A. Jacobs and J. Teeters, "The computational eye", IEEE Spectrum, pp. 30-37, May 1996
 7. J. Richter and S. Ullman, "A model for the temporal organization of X and Y type receptive fields in the primate retina", Biol. Cybern., vol. 43, pp. 127-145, 1982
 8. D.J. Fleet, P.E. Hallett, and A.D. Jepson, "Spatio-temporal inseparability in early visual processing", Biol. Cybern., vol. 52, pp. 153-164, 1985
 9. 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
 10. R.Y. Chan and K.I. Naka, "The amacrine cell", Vision Res. vol. 16, pp. 1119-1129, 1976
 11. P.L. Marchiafava and V. Torre, "The response of amacrine cells to light and intracellularly applied current", J. Physiol. vol. 276, pp. 83-102, 1978
 12. M.W. Dubin, "The inner plexiform layer of the vertebrate retina : a quantitative and comparative electron microscopic analysis", J. Comp. Neurol., vol. 140, pp. 479-506, 1970
 13. D. Marr and S. Ullman, "Directional selectivity and its use in early visual processing", Proc. R. Soc., vol. 211B, pp. 151-180, 1981
 14. J.E. Dowling, "The RETINA : An approachable part of the brain", Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge MA, pp. 13, 101-116, 1987