

Color Vision의 Physiology와 Color Space

전북대학교 공과대학 섬유공학과
*(주)삼양사 종합연구실

이종문 · 조순채 · 이종신*

1. 서 언

Color vision 현상은 대상물질(object)에 의해서 투과(transmission), 굴절(refraction), 반사(reflection)되어 나오는 광(light)이 망막(retina)에 비칠 때 시신경을 자극하여 뇌에 전달됨으로써 일어나는 하나의 감각현상(sensation)이다. 그러므로 그것은 인간의 감각상태, 광의 종류, 대상물질의 환경조건에 따라서, 즉 시각이 이루어진 그 순간에 인간의 눈이 어떻게 작용(functioning) 하느냐에 달려있는 복잡한 현상이다. 그래서 지금까지 발표된 20여개의 색채공간(color space) 중 그 어느 것도 인간의 감각량을 똑같이 표현할 수 없었던 것은 사실이다. 모든 자연현상이 그렇듯 인간도 개체마다 모두 다르고 대상물질 및 광에 관련된 너무 많은 요소(Factor)가 색지각 현상에 작용하기 때문에 이의 과학적 표현을 위해서는 단순화(simplification) 및 normalization의 과정을 거치지 않으면 안되었던 것 같다.^{1,2)} color vision 현상을 보다 정확히 표현하기 위해서는 perceptibility에 그 근거를 두어야 되고, 그러기 위해서는 color vision에 관한 physiology 분야에서 색지각 process가 모두 밝혀지지 않으면 안되리라 믿는다. 그래서 여기서는 Polyac(1941),⁴⁾ Dowling(1966),⁵⁾ Werblin(1973),¹⁸⁾ Rodieck(1973),⁶⁾ Wald(1963),⁷⁾ Nakanishi(1979),⁸⁾ Coren(1979),⁹⁾ Marc(1982) 등으로 이어지는 연구결과를 참고하여, stimulus가 각막에 주어질 때 망막의 Rod와 Cone cell로부터 Bipolar cells, Horizontal cells, Amacrine cells, Ganglion cells 등에 어떻게 전달되어 Ganglion cells에서 어떻게 nerve impulse로 만들어지는가 하는 process를 고찰한 다음³⁻²³⁾ 이 nerve impulse가 optic nerve를 통해서 optic chiasm-optic tract-lateral Geniculate Nuclei-visual cortex of brain로

들어와 brain이, 그렇게 만들어진 Information을 어떻게 Analysis 하는가 하는 Color Vision에 관한 생리학적인 전과정을 논술함으로써 지금까지 발표된 20여개의 color space 중 perceptibility에 근거를 둔 유일한 color space인, Munsell color space의 해석에 Spline method 같은 수치 해석적 방법을 쓰지 않으면 안되는 그 이유를 제시하려 한다.

2. EYE와 RETINA²⁾

2.1 EYE

광이라는 자극(stimulus)이 눈의 각막(Cornea)을 때리면 각막은 망막(Retina)상에 물상을 형성하기 위해서 들어오는 광을 굴절시키는데 이때 Pupil 둘레에 색깔(사람에 따라 blue에서 black까지 여러가지 임)을 띤 신축성이 좋은 Iris라는 것이 있어 Pupil의 크기를 변화시킴으로써 눈에 들어오는 빛의 양을 조절해 준다.

광은 각막을 지나 eye lens를 지나는데 이것은 onion과 같이 많은 얇은 층들의 접을 이루고 있는 것으로 원근의 Vision에 따라 Cornea의 focusing을 조절하는 역할을 한다. 나이가 많아짐에 따라 새로운 층이 늘어나서 lens의 안쪽에 있는 세포는 영양분이나 산소의 공급을 받을 수 없게 되어 굳어지게 되고, 결국은 죽어버리게 된다. 본래 lens는 visible light(가시광선)은 투과시키지만 370 nm의 UV 전 자파는 흡수하게 되어 있는데, 나이가 많아짐에 따라 세포가 죽게 됨으로써, lens는 yellow색을 띠게 되어 그 흡수가 blue light 쪽으로 서서히 확장됨에 따라, blue light에 대한 sensitivity가 감소하게 되는 것이다(Fig. 1).

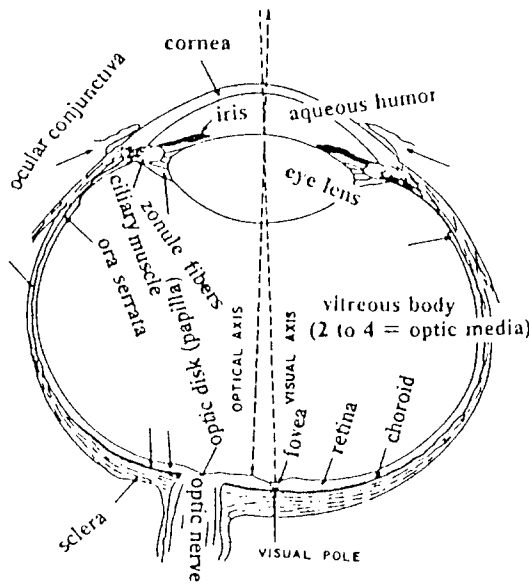


Fig. 1. Schematic nearhorizontal midian section of the right eye seen from above (Wyszecki, 1982)

2.2 Retina²⁾

Retina란 "net"란 뜻을 갖는 Latin 말이다. 아마 그것이 눈알의 안쪽 표면을 blood vessels의 network로 덮여 있는 것처럼 보이기 때문에 그렇게 불려진 것 같다. 인간의 retina는 눈의 안쪽 1100 mm²의 면적을 덮고 있고 그것의 평균 두께는 250 um (tissue volume 27.5 mm³)이다. 이 작은 부피내에 각각 다른 종류의 nerve cell이 약 2억개가 있어, 그들은 Retina내에 들어오는 visual stimulus의 초기단계의 processing에 각각 다른 조작으로써 작용하게 된다. 또 Retina는 많은 neuron들을 포함하는데, 그 구조에서는 유사성이 있지만, 어느 두 개의 neuron도 형태가 같은 것은 없다. 또 Retina는 blind spot(optic disk, papilla)를 제외하고 Fig. 1에서 보는 바와 같이 눈의 안쪽에 Retina의 경계인 Ora Serrata까지에 걸쳐 존재한다. Retina는 그 형태에 따라 Muller(1851)와 Schultze(1866) 등이 Rod(cylindrical)와 cone(tapered)로 분류했는데(Fig. 2) 눈 속에는 약 1억1천만개의 Rod와 7백만개의 Cone이 존재한다. 안구의 1.7-2.0°(Polyac 1941)에 해당되는 Fovea(Latin어 "Pit")라는 곳에는 10만-15만의 Cone이 밀집해 있는데 10°되는 곳에서는 cone의

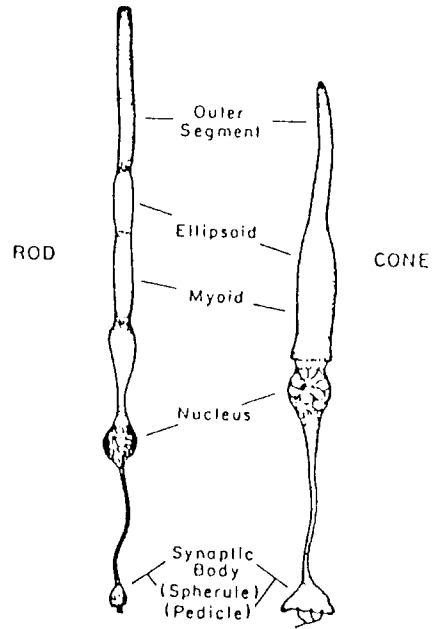


Fig. 2. Main structure features of a typical human rod and cone (rodieck, 1973).

수가 급격히 감소해서 그 밖에서는 거의 찾을 수 없다. 18°되는 곳에서 Rod를 가장 많이 발견하게 되고 Fovea로부터 100°의 위치에서는 Rod의 수가 급격히 감소한다(Fig. 3).

2.3 Retina의 구조

Polyak(1941)⁴⁾은 광학현미경에 의해서 고등동물의 Retina를 관찰한 결과 Fig. 4와 같은 도해(schematic diagram)를 제시하였다. 그는 Retina를 그림에서 보는 바와 같이 10개의 층으로 분류하여 설명하고 있는데 요약하면 다음과 같다. 아래에 제시한 번호는 Fig. 4에서 표시한 각 층(layer)의 번호와 일치한다.

(1) Pigmentepithelium : Non-photosensitive melamin pigment를 포함함으로써, Retina에서 흡수되지 않고 통과해 온 모든 광을 흡수하는 역할을 한다. 그렇게 해서 Light의 scattering과 reflection을 줄임으로써 Retina상에 형성된 image의 blurring (fogging) 현상을 막아준다.

(2) Rod와 cone layer(Bacillary layer) : 두 개의 segment로 되어 있는데 outer segment는 vision에

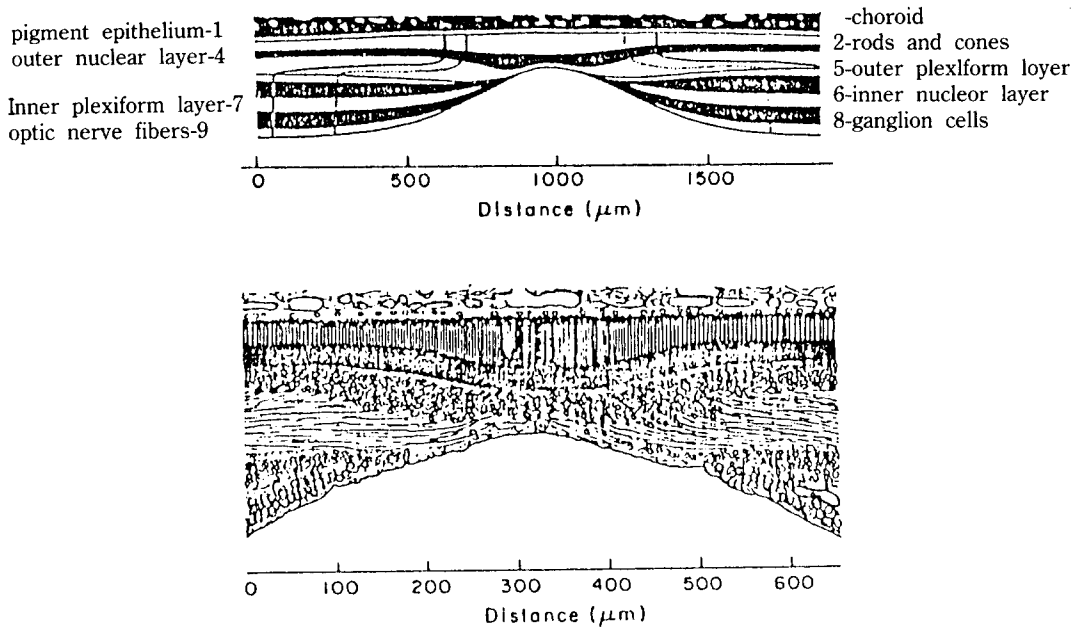


Fig. 3. Structure of the human fovea.(S.L. Polyak, 1941)

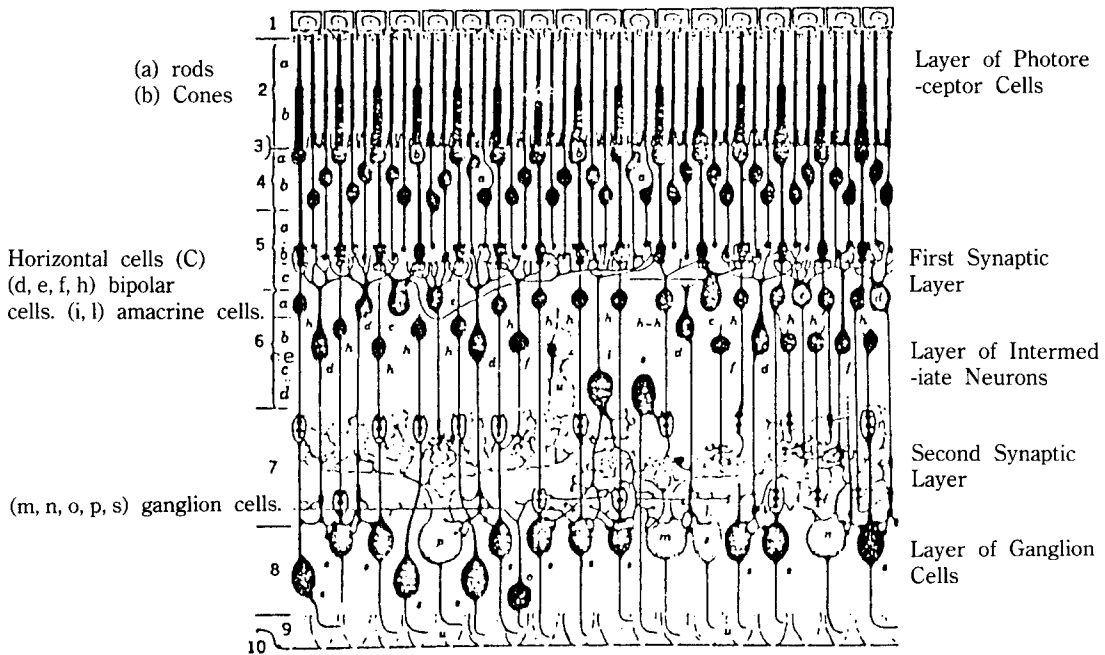


Fig. 4. Schematic diagram of the structures of the primate retina that can be observed through a light microscope. (Polyak, 1941)

대한 실제의 light-sensitive pigment가 포함되어 있다.

(3) Outer limiting membrane : Retina의 골격을 유지해주는 Muller의 섬유실로 되어 있는 얇은 sheet상의 바깥쪽 막.

(4) Outer nuclear layer : 주로 Rod와 Cone의 cell body(nuclei)

(5) Outer Plexiform layer : Rod와 Cone의 inner fibre(axon)와 Horizontal cell의 Dendrite와의 연결부분.

(6) Inner nuclear layer : 여러 가지 형태의 Bipolar cells, Horizontal cells, Amacrine cell들의 핵

(7) Inner plexiform layer : Bipolar cell의 axon과 Ganglion cell의 Dendrite가 연결된 부분.

(8) layer of Ganglion cells : Rod와 Cone에 들어온 모든 정보를 집합해서 nerve impulse를 만들어 optic nerve를 통해서 brain에 전달하는 cell.

(9) Layer of optic nerve fibre : 안구를 떠나서 뇌로가는 Ganglion cell로부터 시작하는 신경 섬유.

(10) Inner limiting membrane : 얇은 sheet상의 안쪽의 섬유질막

Tissue 시료를 조작하는 기술이 발전하고 전자현미경의 사용이 가능해지자 Stell(1972), Dowling

(1966), Boycott(1966), Rodieck(1973), Werblin(1973), Michael(1969) 등은 광학현미경으로 관찰할 수 없었던 Retina의 ultrafine structure를 관찰한 다음 Fig.5와 같은 도해를 제시하게 되었다.

그림에서 보는 바와 같이 Retina 구조를

(I) Layer of photoreceptor cells(Rod와 Cones)

(I/II) First synaptic layer(outer plexiform layer)

(II) Layer of intermediate neurons(inner nuclear layer)

(II/III) Second synaptic layer(Inner plexiform layer)

(III) Layer of Ganglion cells

로 구분하고 있는데 이는 Polyac(1941)의 (2), (3), (4)의 분류를 I의 photoreceptor cells의 항에 포함시켰을 뿐 크게 다르지 않은 것 같다.

3. Visual Image의 Retinal processing

3.1 Neuron(혹은 Nerve cells)

Neuron은 Fig.6에서 보는 바와 같이 1) Cell body 2) Dendrites 3) Axon으로 구분되는데 Cell body는 cell의 핵으로써 enzyme 등을 합성하는 역할을 하는 것이고 Dendrite는 들어오는 signal을

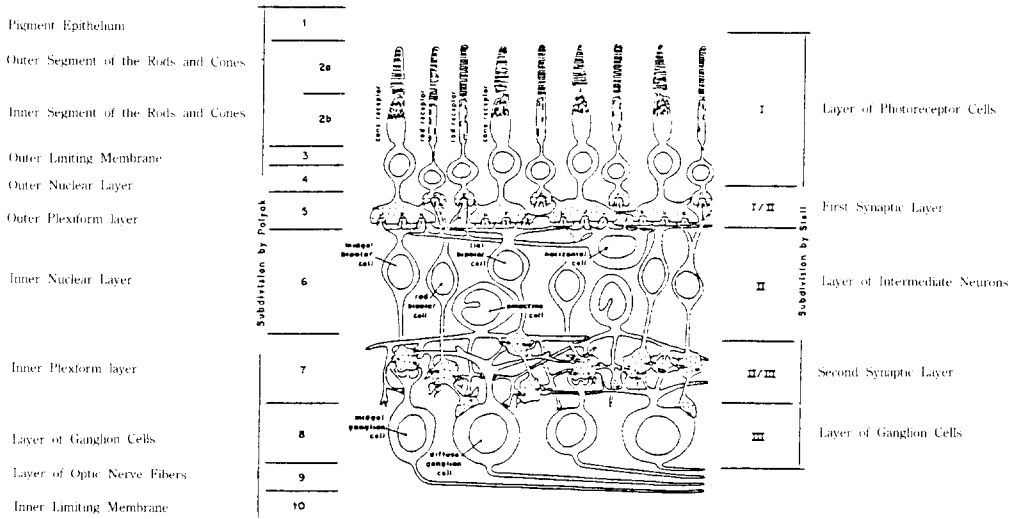


Fig. 5. Schematic diagram assembled by Dowling and Boycott(1966) of the ultrafine structure of the primate retina that can be observed through an electron microscope. (Dowling *et al.*, 1966)

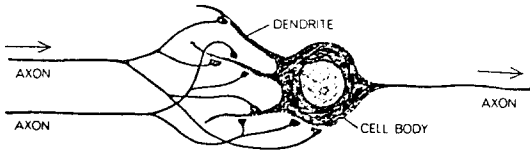


Fig. 6. Neuron and its information transmission (Michael, 1969)

Cell Body로 나르는 역할을 하며 Axon은 cell body로부터 나오는 signal을 다른 nerve cell로 전달해 주는 역할을 한다.

한 Cell의 Axon과 다른 cell의 Dendrite 사이의 terminal point를 Synapse라 부르는데, 하나의 impulse가 여기에 다다르면 transmitter molecules이 갑작스럽게 방출하게 되고 그것들은 두 cell들의 gap 사이에 놓여있는 유체(fluid)속으로 확산해 들어가게 된다. 이렇게 해서 information을 받는 neuron의 전기적인 작용을 바꾸어 주게 되는 것이다.

3.2 Nerve Cell들의 생리학적 기능

Bipolar cells은 Excitational cell이고 Horizontal cell은 inhibition으로써 작용한다. 만약 Rod와 Cone으로부터의 signal이 excitation의 성질을 갖는 것은 직접 Bipolar cell로 전달되고, inhibition의 성질을 갖는 것은 Horizontal cell로 전달되어 진다.

Amacrine Cell은 Bipolar cell에 의해서 exciting 되는 cell으로써 그 작용은 Horizontal cell과 비슷하나 그들은 Ganglion cell을 inhibit하는 역할을 한다. Bipolar cell은 Depolarizin signal을 만든다. 또한 Bipolar나 Horizontal cell로부터의 Response가 연속적인 형태를 취하지만 Amacrine cell로부터의 inhibitory signal은 불연속적-처음에는 매우 강하나 순식간에 사라져 버리는 형식이다.

Ganglion cell은 signal이 Bipolar cell에서 직접 왔느냐 Horizontal 또는 Amacrine cell로부터 왔느냐에 따라 simulation pattern이 다른 형태를 취한다. 약간의 Ganglion cell은 광의 intensity의 변화에 response를 나타내기도 하고 contrast의 가장자리에 대한 response를 하기도 한다.

3.3 Ganglion Cell의 Light Response Mechanism

1938년 U. Penn. 대학의 Hatline은 electrophysio-

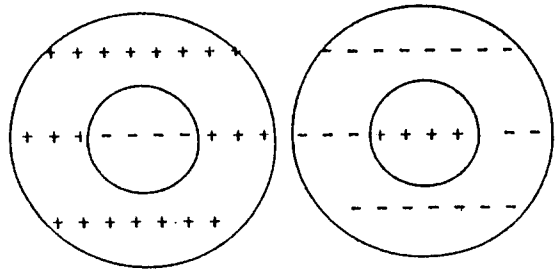


Fig. 7. Receptive field organization of retinal ganglion cells.

Stimulation in central region produced excitation(+), stimulation of the surround produced inhibition(-). (Hartline, 1938)

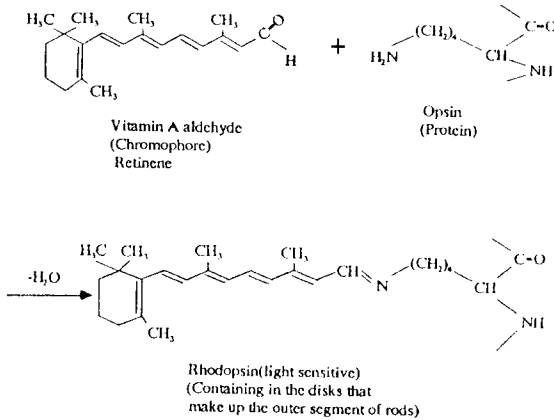
logical method를 사용하여 개구리의 Retina의 Optic nerve fibre를 분리해 내는데 성공했다. 그는 그것으로부터 Ganglion cell이 빛을 받을 때 nerve impulse를 방출한다는 것을 발견하고 이들을 illumination에 대한 Ganglion cell의 response에 따라서 "on", "off", "on-off"로 분류하였었다. 그는 이에 대한 공적으로 1967년 Granit, Wald 등과 공동으로 Nobel 생리학 의학상을 받았었다. 2차 세계대전 후 Micropipette electrode가 개발되자 Kuffler(1953)는 고양이 Retina에 그것을 꽂아 놓고 움직이는 작은 광의 spott를 가지고 Retina의 여러 부위를 자극했을 때 single Ganglion cell의 전기적인 작용을 증폭하여, Oscilloscope screen 상에 spike로 나타나도록 해서 실험한 결과 다음과 같은 사실을 발견하였다.¹⁷⁾

빛이 central area에 있을 때, 약간의 Ganglion Cell은 spiking discharge에 의해서 impulse를 함으로써 "on" impulse를 만들고 약간의 다른 Ganglion cell은 아무런 impulse를 만들지 않았지만 그 Cell은 light를 끄자마자 "off" impulse를 만들었고 주위의 response는 중심부의 그것에 반대였으며 그 중간 지역에서 "on-off" discharge가 또한 발견되었다. 그것은 빛의 spot가 중심부에 비추일 때 약간의 Ganglion cell에 대해서는 excitation을 일으키지만 주위에 비추인 빛은 cell의 activity를 억제하는(inhibition) 결과를 가져온다는 것을 의미한다. 그리고 다른 cell에서는 반대현상이 생긴다.

4. Rod와 Cone Pigment

4.1 Rhodopsin

Wald(1963) (Harvard univ)는 Rod내의 visulal pigment는 vitamine A aldehyde가 protonated schiffbase(RCH=NR', Azometine)에 의해서 lysine (opsin)과 연결된 구조를 갖는다고 하였다.



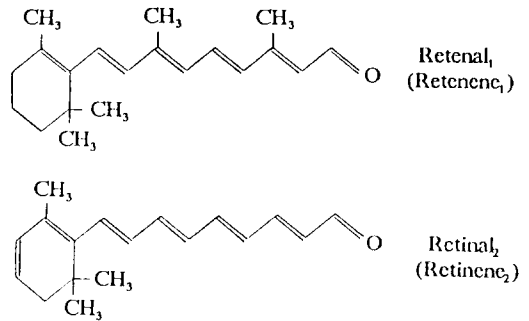
그는 또한 Rhodopsin을 빛에 노출시켰을 때, 그것의 기하학적인 구조를 바꾼다는 것을 입증하였는데 그는 이공적으로 1967년 Hartline과 함께 생리학, 의학분야에서 Nobel상을 받은 바 있다.

그 뒤 Williams(1975)¹¹⁾는 광자(photon)가 흡수될 때, twist형으로 구부러져 있는 11-cis aldehyde가 protonated schiff base를 갖는 직쇄의 all-trans형으로 바뀐다고 하였다. Retina은 λ_{max}가 376.5 nm인데 protonated schiff base에 의해서 protein에 결합되어 있을 때는 λ_{max}가 440 nm로 변하게 된다.

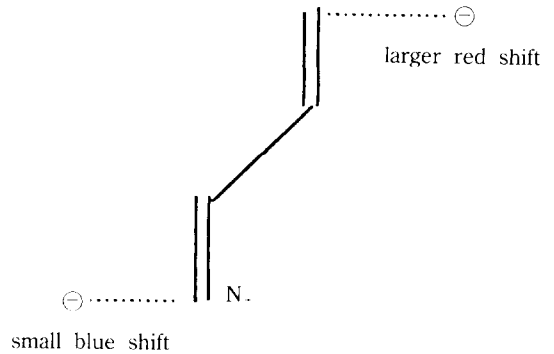
4.2 Rhodopsin Pigment의 Wavelength Regulation Mechanism

최근까지 만해도, 인간의 Retina에는 blue, green, red색에 상당하는 3종의 Cone cell(λ_{max}는 각각 440, 535, 575 nm)이 존재할 것이라고 믿어져 왔다. 4.1에서 Wald 등에 의해서 밝힌데로 같은 chromophore를 가지고 이들 cell들이 인간의 뇌속에 모든 색(rainbow of colors)을 어떻게 만들어 낼 수 있을 것인가?

Nakanishi 등(1979)⁸⁾은 retinal과 비슷한 분자들



을 합성해서, 하전을 고정해 주면서 분자들의 기하학적 모형을 관찰한 바 있다. 그들은 하전이 빛을 흡수한 bond들로부터 3Å의 거리에 있을 때 λ_{max}가 변하며, 그것의 대이온(counter-ion)이 protonated schiff base의 N⁺로부터 3Å 떨어진 곳에서 생긴다는 사실을 밝혀낸 바 있다.



그래서 visual pigment의 wavelength regulation은 chromophore 주위에 위치하는 외부 하전에 기인하며, 외부 하전은 C=N⁺ bond와 C=C bond로부터 3Å 떨어진 곳에 있고 사람의 경우와 다른, 동물의 경우는 visual pigments가 그들의 Opsin의 성질만 다를 뿐 chromophore는 전혀 다르지 않으며, 광이 때릴 때, chromophore의 electron cloud는 여기상태(excited state)로 재분배되어 protein쪽 하전된 group이 생겨서 그 결과 electron repulsion이 생기게 되고, chromophore는 그 repulsion을 수용하면서 그 기하학적 구조(geometry)를 바꾼다는 결론에 이르게 되었다.

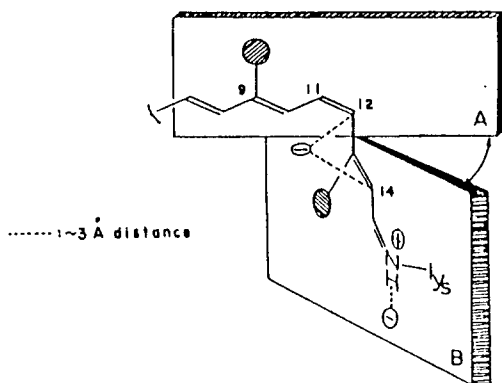
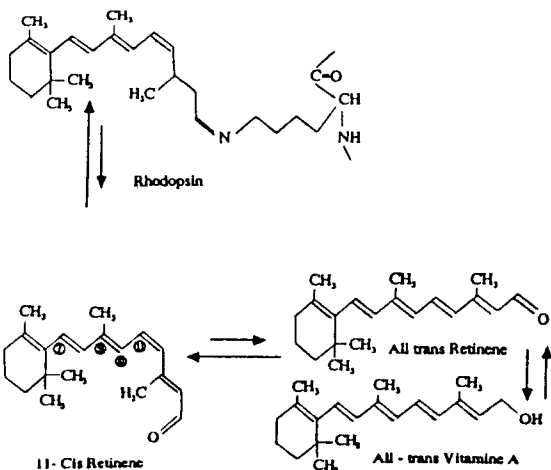
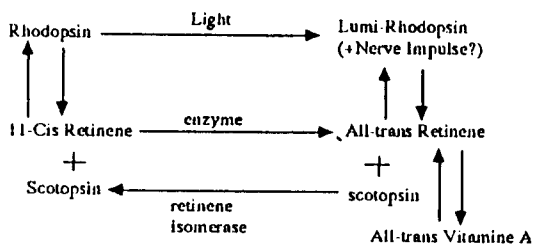


Fig. 8. A Model for electrostatic interactions in the binding site of bovine rhodopsin (Honig, 1979)

4.3 Rhodopsin에 의한 Nerve Impulse의 Production과 그것의 Transmission mechanism

Impulse는 다음과 같이 Rhodopsin의 분해와 재생의 순환과정 즉 "Retinene cycle"에 의해서 만들어진다고 알려져 있다.



광자(photon)가 Rod를 때릴 때, Rhodopsin은 분해하기 시작하고, all trans ratinene이 분리될 때 몇 개의 ion화된 Radical들이 노출되어진다. 그들은 Rod를 excite하게 되고, 이 excitation process 때문에 Na^+ 에 대한 conductance를 감소시키게 되고, 동시에 inner segment는 Na^+ 를 rod의 안쪽에서 바깥쪽으로 pumping하게 된다. Na^+ 이 pumping되어 나감으로써 membrane 안쪽에 전기음성도를 증가시키게 되는데 이 process를 Hyperpolarization이라 부른다. 이와 정반대로 다른 receptor site에서는 stimulation 중 (-)하전이 점점 감소하게 되어 depolarization이 형성된다. 이 Na^+ 의 leakage 현상을 "dark current" 또는 "current flow"라 부르는데 이 작용이 일련의 events를 만들게 되고 이렇게 만들어진 impulse가 axon, dendrite, neuron을 거쳐서 visual cortex에 전달되어 분석되는 것이다.

5. Ganglion Cell의 Nerve Impulse Transmission

Gnaglion cell에서 neural signal이 만들어지면 그 정보의 성격에 따라서 각각 다른 속도로 뇌에 전달되어진다. Rodiek(1967),¹²⁾ Coren(1979)⁹⁾ 등은 정보를 전달하는 속도에 따라서 Ganglion cell을 W. cell(10 m/sec), X cell(20 m/sec), Y cell(40 m/sec)로 구분하고 있다. neural signal이 brain까지 전달되는 경로를 다음 Table 1에서와 같이 요약될 수 있고 다시 이것을 Fig.9에서 그림으로 나타내 주고 있다.

6. Brain의 Visual Cortex

6.1 Visual Cortex

Skull과 그 밑에 뇌척수(Cerebrospinal fluid)라고 부르는 물질에 의해서 둘러 쌓여 있는 인간의 brain은 Cerebrum, Cerebellum, Midbrain, Brain stem 등 4부분으로 나누어지며, 이들 각 부분들은 "Corpus callosum"이라고 부르는 nerve fiber의 다발에 의해서 서로서로 연결되어 있다. 인간 두뇌의 표면에는 회색빛 pink색을 띠고 있는 전체 brain volume의 80%를 점유하는 Cerebral Cortex라 부르는

Table 1. The way of neural signals to brain

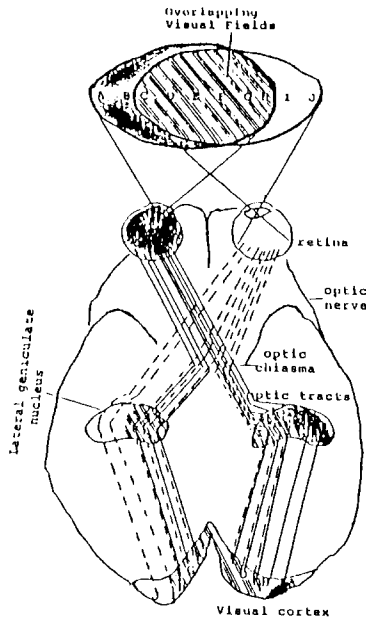
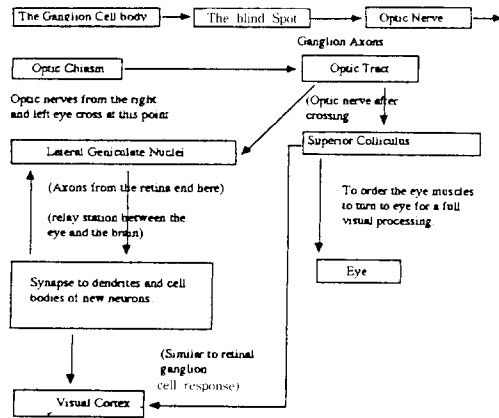


Fig. 9. Nerral Pathways from the Retina to the Visual Cortex. (Celikiz, 1983)

물질로 덮여 있는데, 작은 ridge들이 주글주글하게 서로 뒤엉켜 있는 것처럼 되어있다. Latin어로 "bark"란 뜻을 갖는 이 Cortex에서 인간의 오귀로부터 오는 모든 정보가 분석되고, 그에 대응하는 response가 결정되며 시발되기도 한다.²²⁾ Brodmann은 일찌기 nerve cell과 bundle들의 크기와 형태에 따라서 일일이 번호를 붙여 명명하고 있는데

vision과 관련한 곳은 17번이다. Hubel과 Wiesel¹⁵⁾은 이 17번에 있는 Cortical cell에 electrode를 꽂아서 receptive field를 조사한 결과 각 cell의 neuron activity의 상대적인 복잡성에 따라 simple cell, complex cell, hypercomplex cell로 구분하고 있다.

6.2 Impulse Transmission Mechanism

Nerve fibre(Axon)의 cell membrane은 Na⁺와 K⁺이 투과시킬 수 있지만 Na⁺ 보다는 K⁺에 대해 투과성이 더 좋다. 이 현상과 ATP(Adenosine Triphosphate)에 의한 Na⁺ pumping 작용으로 Cell의 안쪽과 바깥쪽 사이에 Na⁺의 농도구배로 인해서 안쪽 표면을 따라 (-)하전이 조금 더 많이 집결하게 되는 membrane potential의 원인이 되는 것이다(resting potential -60, -70 m volts). 만일 Na⁺과 K⁺가 1 mole 존재한다면 다음에서 알 수 있는 바와 같이 Na/K Galvanic Cell의 cell potential은 0.21 V/mole가 된다.

$$\text{Tug } \text{Na}^+ + e = \text{Na} \text{ standard reduction potential} = -2.71 \text{ V/mole}$$

of

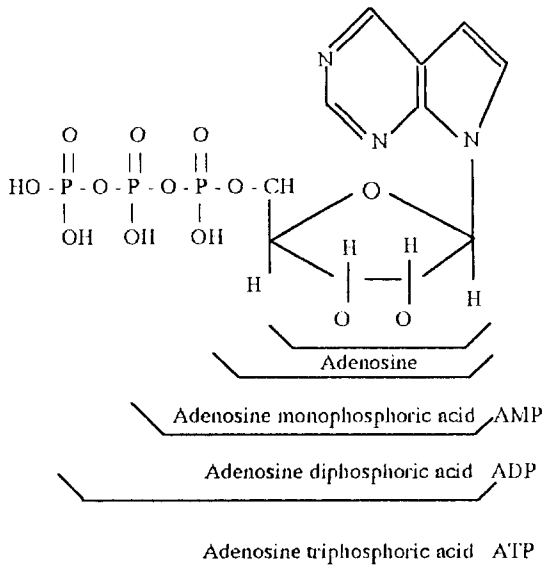
$$\text{war } \text{K}^+ + e = \text{K} \text{ standard reduction potential} = -2.92 \text{ V/mole}$$

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{Na}} - E_{\text{K}} = 0.21 \text{ V/mole} \quad (1)$$

Na⁺의 농도차에 의한 potential은 nernst의 식에 의해서 계산될 수 있을 것이다.

$$E = -\frac{2.303 RT}{nF} \log \frac{[\text{Na}^+]_{\text{dil}}}{[\text{Na}^+]_{\text{conc}}} = -\frac{0.0592}{n} \log \frac{[\text{Na}^+]_{\text{dil}}}{[\text{Na}^+]_{\text{conc}}} \quad (2)$$

Fig. 10에 nerve cell(Axon)이 Nerve Impulse를 받았을 때 channel의 문이 열리고 Na⁺가 Axon 속으로 쏟아져 들어간다. 이로 인해서 membrane potential은 -70 mV에서 +50 mV까지 변하고 Na⁺의 문이 Ca²⁺의 작용에 의해서 닫히고 K⁺ channel의 문이 열린다. 이때 potential의 갑작스런 변화가 생기고 그것은 impulse가 지나갈 때 wave와 같이 axon을 뒤흔다(현악기를 타듯이). Impulse가 지나간 후에 처음에는 K⁺ diffusion, 다음 Na⁺ diffusion이



정상 상태로 돌아가게 된다. Na⁺는 다시 ATP로부터의 Energy에 의해서 pumping out되고 K⁺ ion이 pumping in된다. 이러한 channel의 개폐작용은 impulse가 Axon의 끝까지 이동될 때까지 계속된다. 다음 impulse는 Axon의 끝에 있는 Synaptic vesicles로 들어가는데 거기서 transmitter molecule이 분출되어 복잡한 일련의 molecular events를 만든다. 유리관 transmitter molecules은 특수한 receptor protein에 결합함으로써 일련의 반응들을 촉발시키고 이 반응으로부터 electric impulse를 만들어 그것을 다른 cell의 Dendrite로 전달해 주게 된다(Table 1 참조).

7. 결 언

이상에서 광이라는 자극이 인간의 눈의 각막에 들어왔을 때 lens를 지나 retina를 거쳐 뇌에 전달되어 분석될 때까지의 전 process에 대해서 Hubel, Nakanishi 등이 발표한 최근의 보문들을 참고로 해서 개략적으로 논하고 있다.

Table 2~4는 이를 간단히 정리하여 표시한 것들이다. 이로부터 다음과 같은 color vision의 perceptability와 관련된 몇 가지 사실들을 발견할 수 있다(Fig. 5 참조).

1) 한 개의 Bipolar cell내에, 여러 개의 Rod나 Cone receptor로부터 signal들이 모아진다.

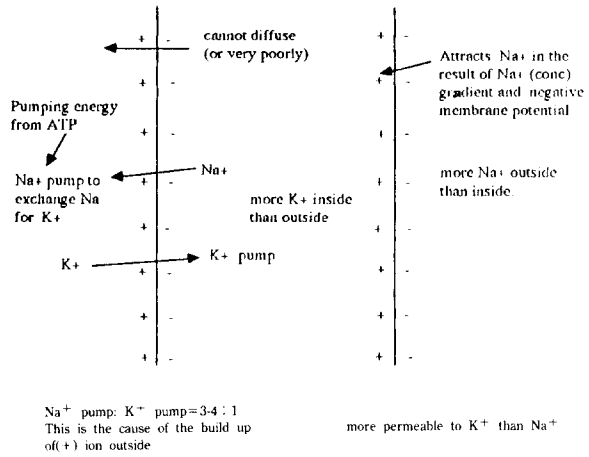
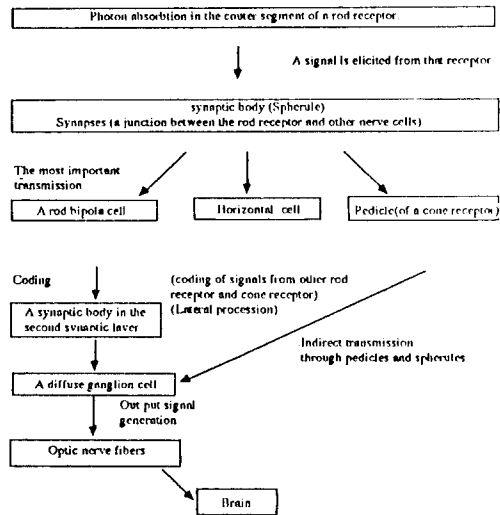


Fig. 10. Establishment of a membrane potential

Table 2. The Processes of Generation, Transmission, and Coding of Signals that take place in the Rod Receptor



2) 같은 Rod receptor들이 한 개의 공통된 Horizontal cell에 연결되어 있는데, 바로 그 Horizontal cell은 다른 retina 영역에 많은 Rod들과 뿐만 아니라 Cone receptor와도 연결되어 있다.

3) Horizontal cell들은 retina의 측면작용(lateral process)에만 개입될 뿐 중간 neuron층의 다른 cell과는 서로 연결되어 있지 않고 Ganglion cell과도 연결되어 있지 않다(Kolb 1970)¹³⁾

Table 3. The Processes of Generation, Transmission, and Coding of Signals that take place in the Cone Receptor.

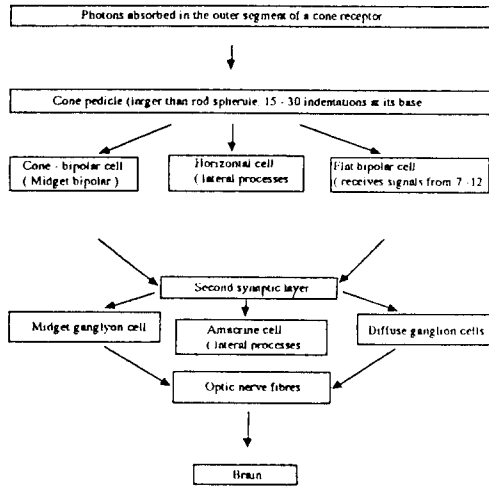
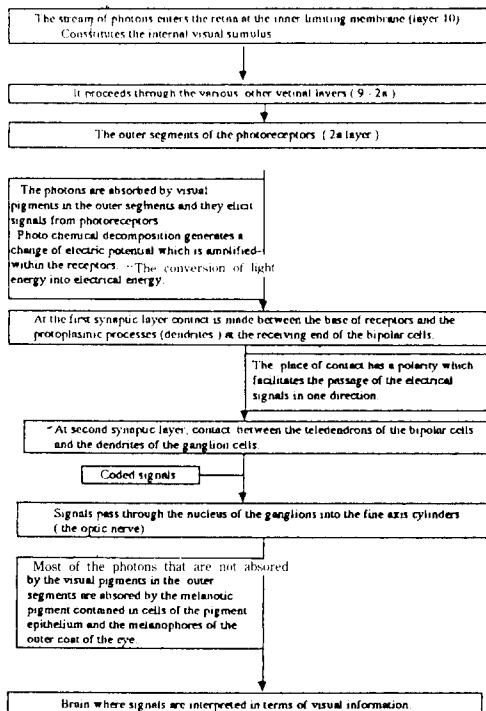


Table 4. The Various Processes of Signal Generation, Transmission, and Coding that take place in the Retinal when a Visual Stimulus Enters.



4) 과거에는 color vision이 Cone cell에 의해서만 관계되고 명암의 문제는 Rod cell에만 관련되어 있다고 생각되었지만

- (1) Rod spherule과 Cone pedicle의 직접 접촉
- (2) Horizontal Cell을 통해서 Rod와 Cone의 간접적 연결

(3) Amacrine과 Ganglion Cell을 통한 Rod-bipolar와 Cone bipolar 사이의 간접적 연결

등의 관찰된 사실로 미루어 Cone과 Rod는 color vision에 상호관련되어 있다.

5) 안구의 2°의 범위에 있는 Fovea에 Cone이 대부분 존재하고 10°되는 곳에서 Cone 수가 급격히 감소하긴 하나 Rod는 18°되는 곳에 가장 많이 존재하고 100°되는 곳에서 급격히 감소한다.

6) Retina 내에는 2억개 이상의 nerve cell이 있어 입사되는 광양자의 stimulus와 상호작용하는데, 어느 두 개의 neuron도 같은 것이 없다.

7) First synaptic layer에서는 photoreceptor cell들에서 전달된 정보를 transmitter molecule의 방출에 의해서 Bipolar cell에 보내질 때, 어떻게 integrate 하는가 하는 것은 아직 밝혀내지 못했다. 이것은 Second synaptic layer의 경우도 같다.

8) Ganglion cell은 signal이 Bipolar cell, Horizontal cell, Amacrine cell 중 어디에서 왔느냐에 따라서 simulation pattern이 모두 다르다.

9) Ganglion Cell이 만드는 "on", "off", "on-off" impulse는 눈이 자극값에 대해서 만드는 최종의 signal이고 그 전의 생리적인 Process에서 전해지는 모든 information을 integrate해서 Multer fibre(optic nerve fibre)를 통해서 뇌에 전달한다.

10) Visual pigment의 wavelength regulation은 chromophore인 Rhodopsin의 주위에 위치하는 외부하전기에 기인하며 impulse는 "Retinene cycle"에 의해서 만들어지고, 그것은 Na⁺의 pumping에 의한 Hyperpolarization 및 Depolarization에 의해서 수행된다.

11) Ganglion cell로부터 Optic chiasm을 거쳐 Visual Cortex로 전달될 때 Superior Colliculus의 feedback system과 Lateral Geniculate Nuclei와 Visual Cortex 사이의 Synapse에서의 정보가 다시 한번 molecule events 일으킨 후 Visual Cortex로 전달되어 분석된다.

12) Nerve fibre에서의 정보의 전달은 cell membrane의 Na^+ , K^+ 의 pumping action에 의한 Galvanic cell과 Na^+ 의 Concentration cell의 cell potential에 의한다.

이러한 눈과 뇌의 신비를 풀어보려는 현대광학의 노력에도 불구하고

$$F_{\text{stimulus(S)}} \rightarrow \text{Eye, Brain} \rightarrow F_{\text{Perceptability(P)}} \quad (3)$$

의 process를 밝히기에는 아직 요원한 것 같다. 즉, 같은 stimulus에 대해서 eye, brain의 심리적, 생리학적인 상태에 따라 perceptibility로 가는 모든 물리화학적인 path를 알아내는 것은 이미 고찰한 바와 같이 지금까지 밝혀진 것만으로는 어렵다고 본다. 그래서 작금의 현실로는 주어진 stimulus와 perceptibility를 직접 관련시켜 color 현상을 해석하지 않을 수 없게 된다. 지금까지 발표한 많은 color space에서 주로 물리화학적인 stimulus에 기본을 두고 만들어진 것은 CIE의 $f(Y, x, y)$ space이고, 인간의 perceptibility에 기본을 둔 Color space는 1929년 Munsell이 만든 Munsell color space $f(H, V, C)$ 이기 때문에 이 두 space의 관계를 해석하는 것이 (3)식의 process를 밝히는 최선의 방법일 것이다.

$$f(Y, x, y) \rightarrow f(H, V, C) \quad (4)$$

$f(Y, x, y)$ 와 $f(H, V, C)$ 의 관계에 대해서는 식 (5), (6), (7)에서와 같이 Y는 V의 함수로 표현이 가능하지만 x, y와 H, V, C의 관계에 대해서는 data points로 주어져 있을 뿐, 상호관계를 수학적으로 표현하지는 못하고 있다.

$$Y = f_1(V) \quad (5)$$

$$x = f_2(H, V, C) \quad (6)$$

$$y = f_3(H, V, C) \quad (7)$$

그러나 최근 data point들로부터 상호관계 해석이 가능한 "Spline"과 같은 수학적 해석방법이 등장함으로써 color space간의 상호관계 해석에도 이 방법을 상용함은 당연하고 color 관계 공업-특히 color의 perceptibility를 중시하는 섬유공업-의 발전에 큰 몫을 담당하리라 믿는다.

References

1. R. G. Kuehni, "Computer Colorant Formulation," Lexington Books, 1975.
2. G. Wyszecki and W. S. Stiles, "Color Science" 2nd ed. John Wiley & Sons, 1982.
3. K. Fukurotani, "Color Information Coding of Horizontal-Cell Responses in Fish Retina" *Color Res.*, 7, No. 2, 146-148, 1982.
4. S. L. Polyak, "The Retina", University of Chicago Press, Chicago, 1941.
5. J. E. Dowling and B. B. Boycott, "Organization of the Primate Retina: Electron Microscopy," *Proc. Roy. Soc. (London)* **166B**, 80-111, 1966.
6. R. W. Roddieck, "The Vertebrate Retina," W. H. Freeman, San Francisco, 1973.
7. G. Wald, P. K. Brown and I. R. Gibbon, "The Problem of Visual Excitation," *J. Opt. Soc. Am.*, **53**, No. 1, 20-35, 1963.
8. B. Honig, U. Dinur, K. Nakanishi, V. Balogh-Nair, M. A. Gawinowicz, M. Arnaboldi, and M. G. Mott, "An External Point-Charge Model for Wavelength Regulation in Visual Pigments," *J. Am. Chem. Soc.*, **101**, 7084-7086, 1979.
9. S. C. Coren and L. M. Ward, "Sensation and Perception," *Academic Press*, New York, 1979.
10. R. E. Marc, "Retinal Neurotransmitters, Morphology, and Color Coding," *Color Res. Appl.*, 7, No. 2, 155-158, 1982.
11. T. P. Williams, "Dynamics of Opsin, a Visual Protein," *Accounts of Chemical Research*, **8**, No. 3, 107, 1975.
12. R. W. Rodieck, "Receptive Fields in the Cat Retina: A New Type," *Science*, **157**, 90-92, 1967.
13. H. Kolb, "Organization of the outer Plexiform of Golgi-impregnated Cells," *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*, **258b**, 261-283, 1970.
14. J. K. Bowmaker and H. J. A. Dartna, "Visual Pigments of Rods and Cones in a Human Retina," *J. Physiol.*, **298**, 501-511, 1980.
15. D. H. Hubel and T. N. Wiesel, "Brain Mechanisms of Vision," *Scientific American*, **241**, No. 3, 150-162, 199.
16. Michael, C. R., "Retina. Processing of Visual Images," *Scientific America*, **220**, No. 5, 104-114, 1969.
17. Mac Nichol, Jr. d. F., "Three-Pigment Color Vision," *Scientific American*, **211**, No. 6, 48-56, 1964.
18. Werblin, F.S., "The Control of Sensitivity in the

- Retina," *Scientific American*, **228**, No. 1, 71-79, 1973.
19. J. J. Vos, "Line Elements and Physiological Models of Color Vision," *Color Res. Appl.*, **7**, No. 2, 208-216, 1979.
20. F. I. Harosi, "Recent Results from Single-Cell Microspectrophotometry: Cone Pigments in Frog, Fish, and Monkey," *Color Res. Appl.*, **7**, No. 2, 135-141, 1982.
22. D. I. A. MacLeod, "The Estimation of Cone Spectral Sensitivities," *Color Res. Appl.*, **7**, No. 2, 142-145, 1982.
22. Hubel, D. H., "The visual Cortex of the Brain" *Scientific American*, **209**, No. 5, 54-62, 1963.
23. Gordon, B., "The Superior Colliculus of the Brain," *Scientific American*, **227**, No. 6, 72-82, 1972.