

# 제1장 Visual System and Psychophysics of Vision

## 1.1 Structure of Eye<sup>[1]</sup>

### (1) 각막(Cornea)

안구 결상계의 비구면형의 제1렌즈로써 optical power 약 43 diopters(디옵터, m 단위의 초점 거리의 역수)의 렌즈이다. 굴절력이 강하여 결상계의 초점 위치 결정에 영향이 크다.

### (2) 전방수(Aqueous humor) 및 초자체 (Vitreous humor)

전방수는 각막과 수정체 사이에 있는 물과 닮은 투명 액체(watery fluid)이며, 초자체는 안구 내의 투명한 젤리 같은 물질이다. 안구 굴절면인 각막 후면 및 수정체 전면에서의 반사를 억제하고 각 굴절면의 간격을 유지하도록 하며 투명 조직에 영양을 보급한다.

### (3) 수정체 (Lens)

모양을 변형하여 optical power를 변화(16 ~ 28 diopters, relaxed lens; 20 diopters) 시켜 망막 상에 초점이 맞도록 한다. 중심부에서부터 주변부에 걸쳐서 비선형적인 굴절율을 가지며 단일 렌즈로 색수차가 적은 구조로 되어 있다.

그림 1.2에는 안구 조직의 분광 투과율과 수정체의 연령에 따른 광 투과율을 보였다. 이 그림에서 연령이 증가할수록 짧은 파장 대역에서의 광 투과율이 저하함을 알 수 있다. 이것은 자외선 UVA 및 UVB 등에 의해 광학계의 손상에 의한 것이다.

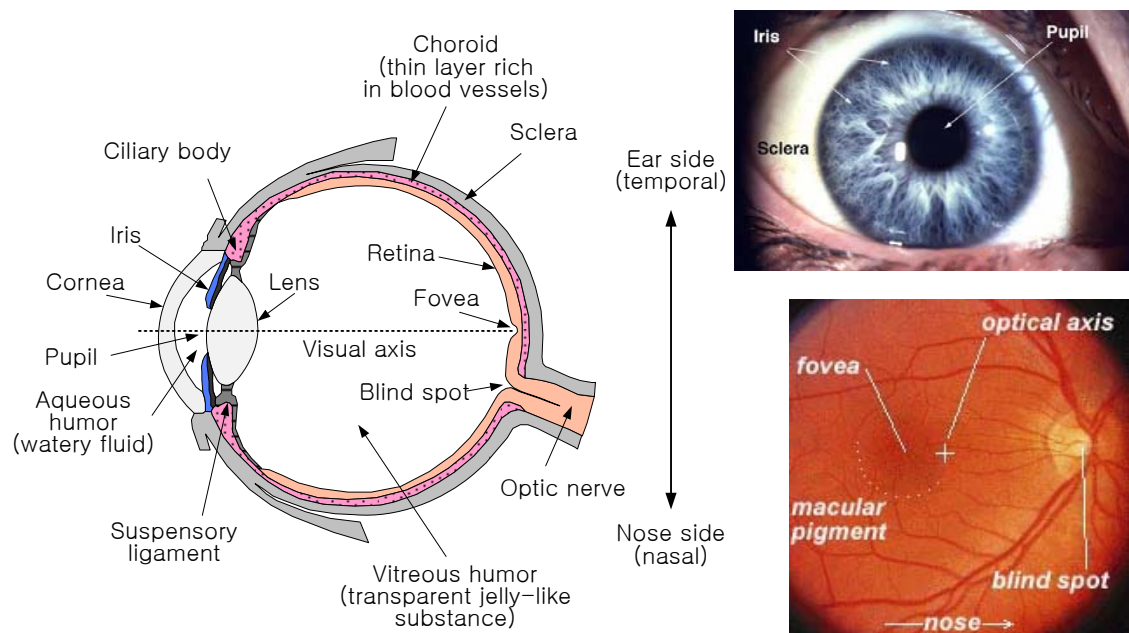


그림 1.1 눈의 구조와 결상계.<sup>[2]</sup>

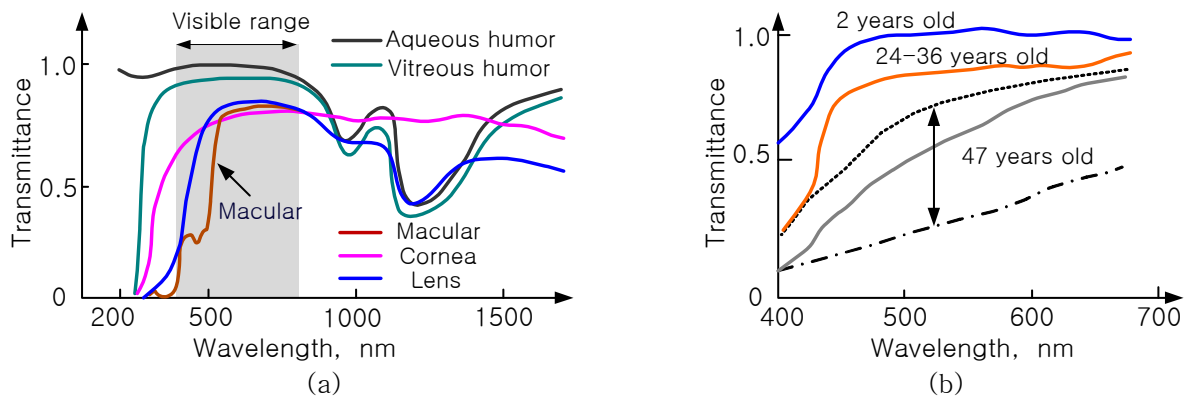


그림 1.2 (a) 안구 각 조직의 분광 투과율과 (b) 수정체만의 연령에 따른 광 투과율.<sup>[1]</sup>

#### (4) 조리개 (Iris)

조리개는 동공(pupil)의 크기를 제어하여 투과 광량을 조절한다. 동공 직경의 크기는 완전 암흑상태에서 약 8 mm이고, 넓은 시야 전체가  $320 \text{ cd/m}^2$  인 경우 약 2.9 mm 정도이다. 표 I은 동공이 열리고 닫히는 속도를 나타낸 것이다. 동공이 밝은 곳에서 작아져 있다가 dark 상태가 되어 완전히 열릴 때까지는 약 3분이 소요되고 그 반대의 경우에는 약 4.5초가 걸린다.

Table I. Speed of opening and closing of eye pupil. Mean data of Reeves(1920) for six observers.<sup>[3]</sup>

Opening in the dark after steady adaptation to a large field of white luminance $320 \text{ cd/m}^2$		Closing on exposure of a dark-adapted eye to the same bright field	
Time (seconds)	Mean pupil diameter (mm)	Time (seconds)	Mean pupil diameter (mm)
0.0	2.9	0	8.0
0.5	3.1	0.1	7.8
1.0	3.5	0.2	7.6
1.5	3.9	0.3	7.2
3	4.7	0.4	6.8
5	5.6	0.5	6.4
9	6.4	1.0	5.3
15	6.6	1.5	4.4
29	6.9	2.0	3.9
60	7.3	2.5	3.5
180	7.6	3.0	3.3
		3.5	3.2
		4.0	3.2
		4.5	3.1

## 1.2 망막의 구조

망막에는 그림 1.3에서와 같이 광전변환소자 역할을 하는 시세포, 신호 형성 소자 역할의 수평세포, 쌍극 세포, 신경절세포가 3차원적으로 구성되어 있다. 시세포에는 暗所視 ( $0.1 \text{ cd/m}^2$  이하)에서 명암정보를 검출하는 간상세포(rod)와 明所視( $10 \text{ cd/m}^2$  이상)에서 명암과 색을 식별하는 원추세포(cone)가 있다. 그림 1.4에 간상세포와 원추세포의 구조를 보였다.

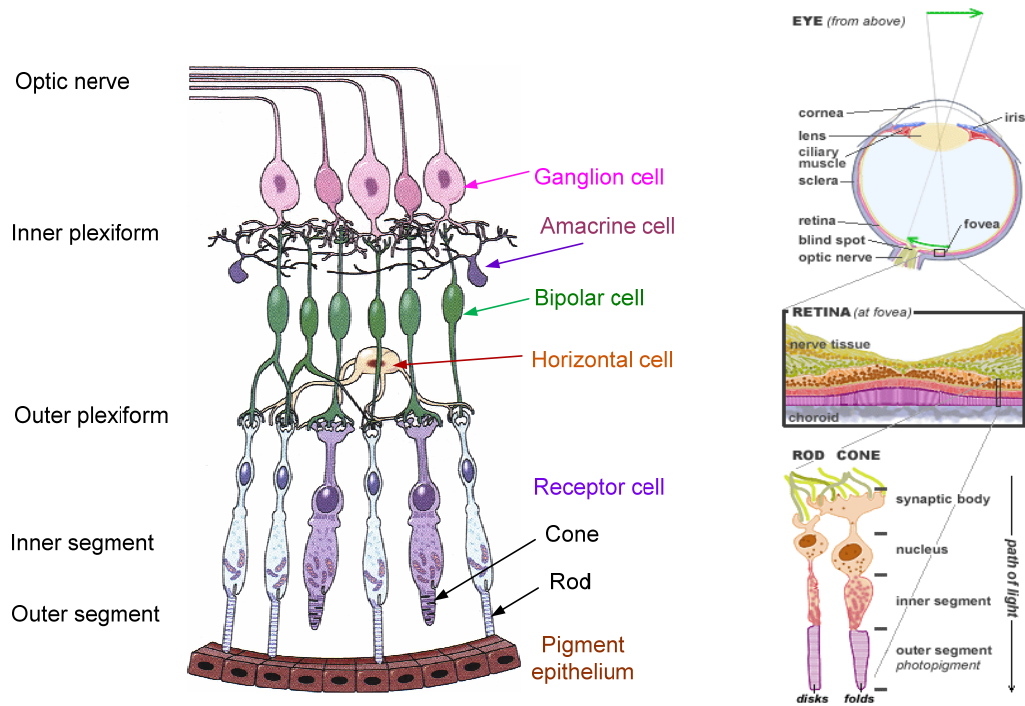


그림 1.3 망막내의 시세포 및 신경세포 회로의 구성도. [43]

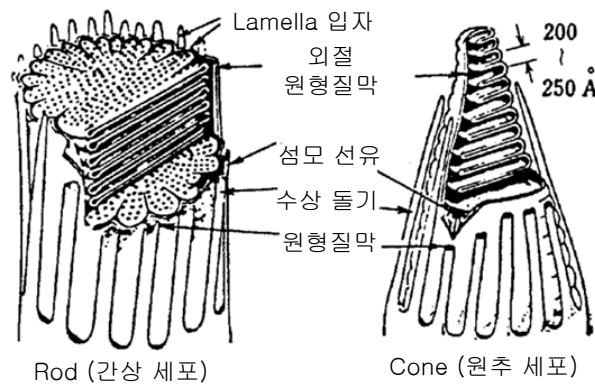


그림 1.4 시세포 rod 와 cone의 구조. [5]

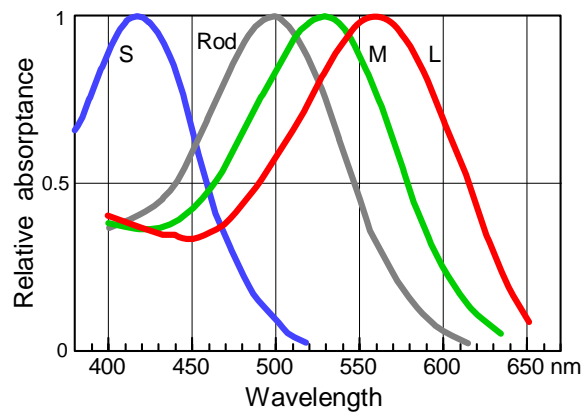
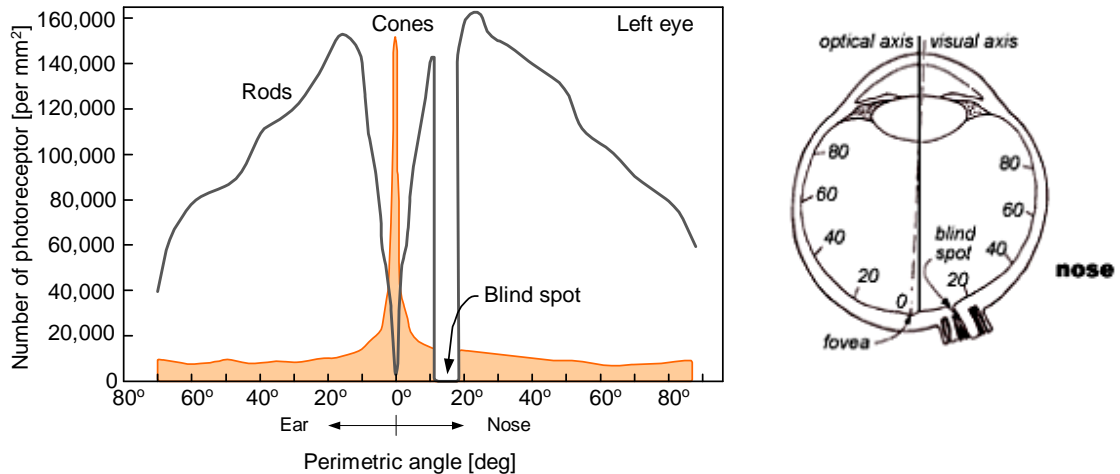


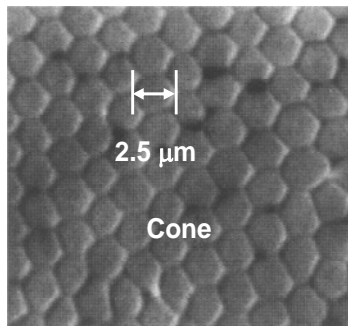
그림 1.5 간상 및 세 종류의 원추 시세포 photopigment의 absorbance 응답 특성(data from Dartnell, Bowmaker, and Mollon, 1983).

그림 1.5에는 간상체 및 원추체 시세포 photopigment의 스펙트럼 응답 곡선을 나타내었다. 간상 세포는 495 nm에서 최대 감도를 가지며, 원추 세포는 최대 감도가 각각 최대 420, 530, 560 nm 인 3 종류가 있다. 3종류의 원추 시세포를 최대 감도를 가지는 파장의 길이에 따라서 각각 S (short) 세포, M(medium) 세포, 및 L(long) 세포, 또는 B(blue), G(green), R(red) 세포라 부른다.

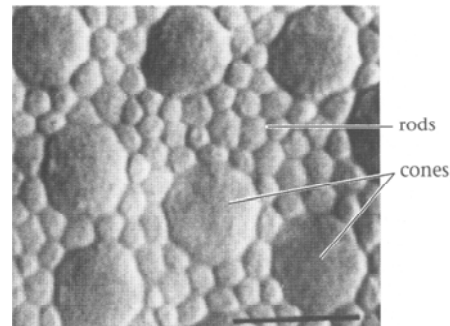
망막상에서의 시세포 밀도는 그림 1.6(a)에서와 같이 원추세포는 황점에서 최대의 밀도를 가지고 주변부로 갈수록 밀도가 현저히 낮아진다. 간상 세포는 황점 중심에는 존재하지 않으며, 맹점에는 시세포가 전혀 없다. 간상 세포의 총수는 약 1억 2천만 개 이고, 원추 세포의 총수는 약 700만 개이다.



(a)



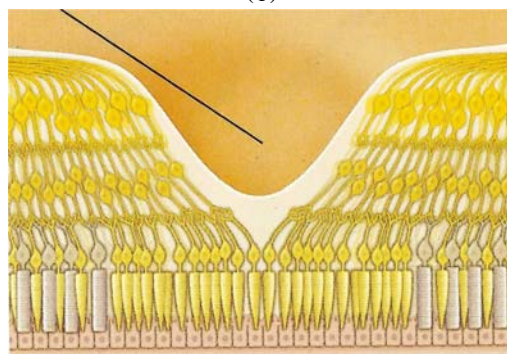
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 1.6 (a) Density of rod and cone photoreceptors,<sup>[5]</sup> (b) cones in the fovea,<sup>[41]</sup> (c) cones and rods in the periphery (near the outer edge of the retina),<sup>[41]</sup> (d) a representation of the photoreceptor mosaic artificially colored to represent the relative proportions of LMS cones in the human fovea,<sup>[43]</sup> (e) typical organization of the cells and nerve fibers of the fovea,<sup>[1]</sup> and (f) general structure and organization of the retina.<sup>[44]</sup>



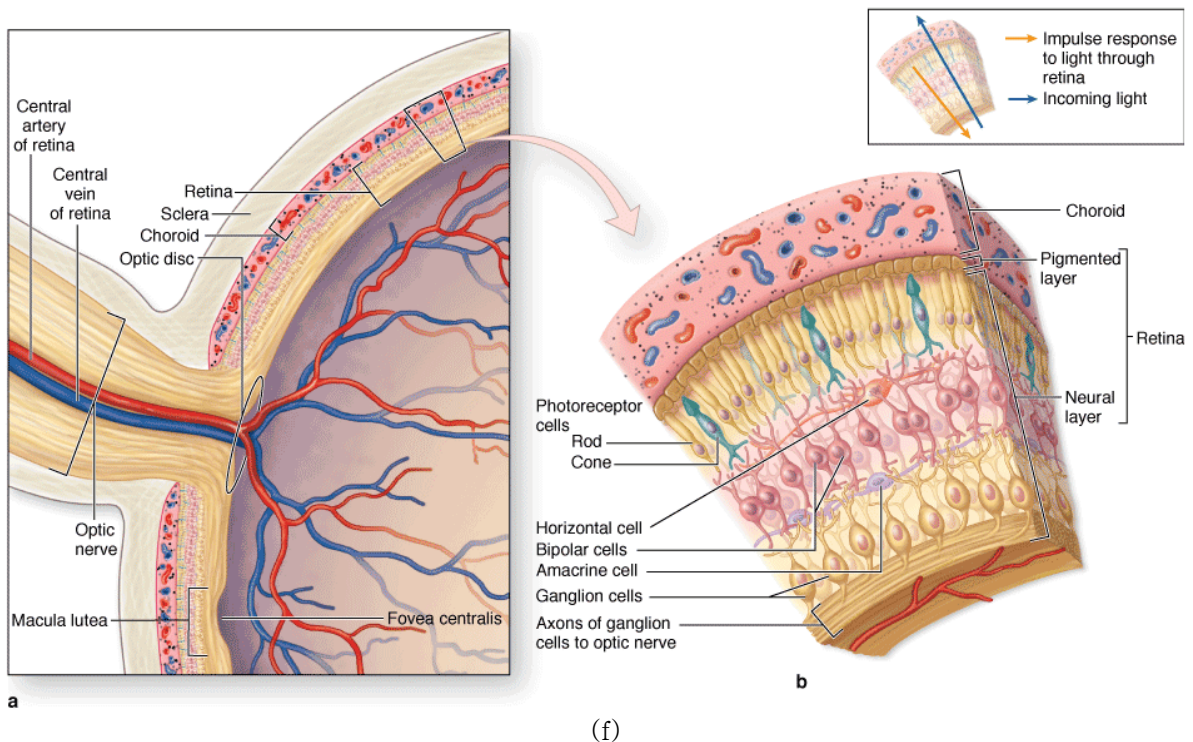


Fig. 16 (Continued)

그림 16 (b)는 황점상에서의 cone을 나타낸 것이며, 황점상의 cone의 직경은  $1 \sim 4 \mu\text{m}$ 이다. 그림 (c)는 주변 망막상의 cone과 rod가 혼재되어 있는 모습을 보인 것이다. 황점 부근의 Rod 직경은  $1 \mu\text{m}$ 이고, 주변부의 cone의 직경은  $4 \sim 10 \mu\text{m}$ 이다. 황점 상에서 L 및 M cone의 간격은  $0.5 \text{ arc min}$ 이고, S cone의 간격은  $10 \text{ arc min}$ 이다.

그림 1.6(d)는 황점 상에서의 LMS 시세포 분포를 나타낸 것이다. 이 그림은 L, M, S 각 시세포의 상대적 밀도를 알기 쉽게 각각 red, green, blue의 색을 인위적으로 입혀서 나타낸 것이다. LMS 시세포 밀도 비는 망막 위치마다 약간씩 다르나 망막 전체에 대해서 평균적으로 약  $L:M:S=60:30:5 \sim 10$ 이며, 황점의 가장 중앙에는 S 시세포가 없다. LMS 시세포간의 밀도 차이를 신호처리 입장에서는 보면 공간 샘플링 주파수가 서로 다른 것과 동일하다. 따라서 색상에 따른 공간 주파수 특성에 영향을 끼친다.

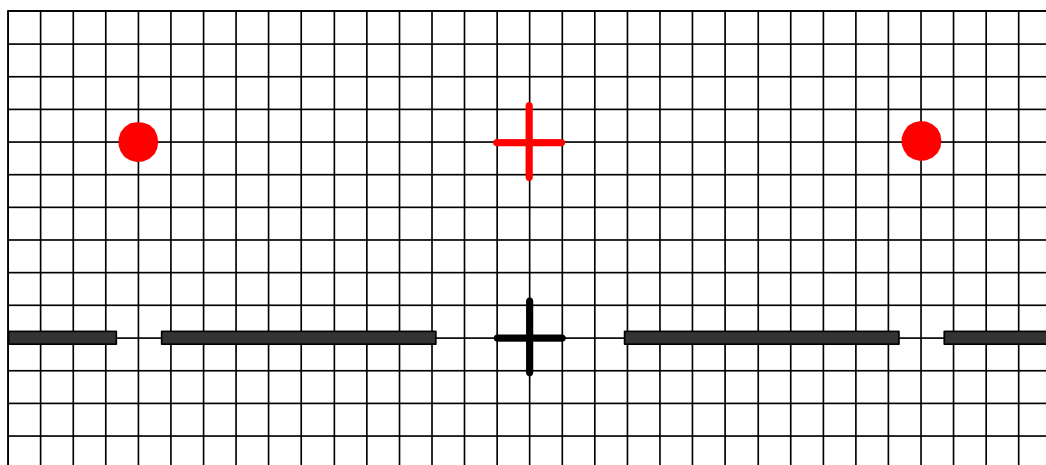


그림 1.7 Test pattern of the blind spot position.

그림 1.7은 맹점의 존재를 스스로 확인할 수 있는 그림이다. 이 그림을 오른쪽 눈을 가리고 왼쪽 눈으로 중앙의 + 을 약 25cm 정도 떨어진 곳에서 보면 왼쪽 점이나 끊어진 선이 맹점에 결상되어 보이지 않는다. 이때, 빨간 점이 있어야 할 위치에는 주변의 영상이 메꾸어져 바둑판 무늬가 보일 것이다. 그리고 끊어진 선은 연결되어 보일 것이다. 이 현상을 filling-in phenomenon이라 한다.

## 1.3 신경로, 시각 중추 및 제어계

### 1.3.1 신경로

신경절 세포의 축색이 시신경으로써 망막 유두부에서부터 중추까지의 신호전달 신경로가 된다. 시신경 섬유는 약 100만개으로써 시세포 총수의 약 1/150이 된다. 망막 중심부의 신경로 수는 시세포수에 대응하나, 망막 주변부에서는 신경로의 수가 작다. 그림 1.8에 시각계 정보 처리 신경로를 나타내었다.

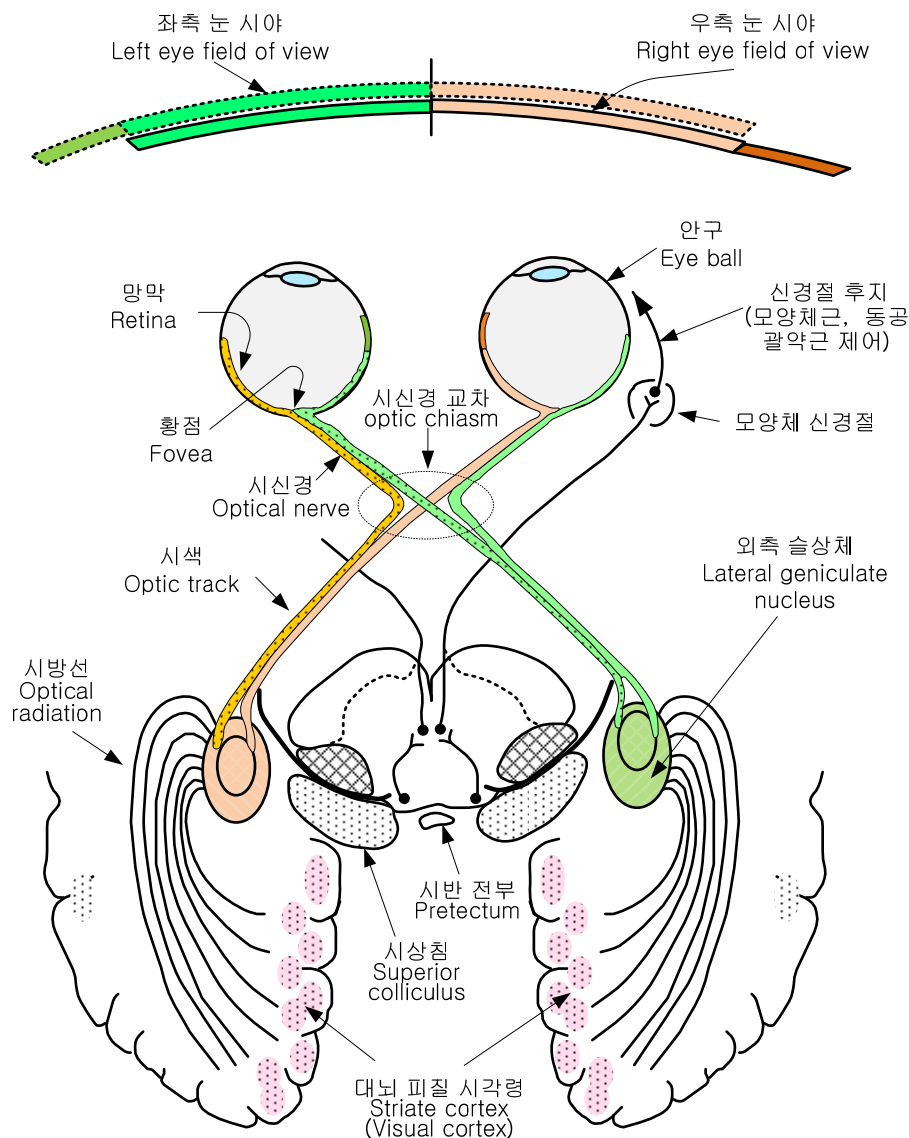


그림 1.8 Schematic diagram of the visual pathway from the retina to the visual cortex.<sup>[4]</sup>

양안의 시신경은 시신경 교차(optic chiasma)에서 반씩 교차하고, 우반 시야의 정보는 대뇌 좌반구로, 좌반 시야 정보는 대뇌 우반구로 전달된다. 시신경에서 시색(optic tract)으로 되어 신경로는 외측 슬상체(lateral geniculate body)에서 양안의 신호가 정리된다. 그 이후의 신경로는 시방선(visual radiation)이 되어 시각령(visual cortex)으로 전달된다.

### 1.3.2 시각 중추<sup>[6]</sup>

외측 슬상체로부터 신호를 받는 대뇌 후두부의 시각령은 제1차 시각 피질이라 불리고, 망막 시야와의 대응관계를 유지하면서 도형, 색정보 검출, 및 처리를 행하는 세포가 존재한다. 이들 세포는 대뇌 피질에 규칙적인 입체 column 구조로 분포하고 있다. 제1차 시각 피질 보다도 고차적인 정보처리를 하는 중추에서는 얼굴 등과 같이 특정 자극에 반응하는 패턴 지각 세포나, 운동 공간 지각 세포 등이 발견되며, 시각 정보의 인식에서 행동기에 지령을 내리는 중추로 되어 있다.

### 1.3.3 제어계<sup>[7]</sup>

시각 정보를 능동적으로 수용하는 제어계에는 수정체의 초점 조절계, 광량 조절의 홍채 제어계, 주시점 이동의 안구 운동계가 있다.

#### (1) 초점 조절 기구

인간은 수정체의 형상 변화에 의해 초점을 조절한다. 자동 초점 조절 기구는 망막상의 흐릿한 정도가 검출 한계 이상이 되면 굴절력이 증가 하는 방향으로, 검출 한계 이하가 되면 굴절력을 감소 시키는 방향으로 조절한다.

#### (2) 홍채 제어계

결상계의 조리개 역할을 한다. 광량 조절과 초점 심도를 변화 시키며 망막의 상을 최량의 상태로 유지시킨다. 광량에 대한 조절 범위는 약 16배 정도이므로 시각계의 광량 범위  $10^{-4} - 10^5$  cd /  $m^2$  의 명암 지각은 주로 망막에서 감도조절 기능에 의존한다.

#### (3) 안구 운동

도약적 운동: 독서 시에 주시점이 비월 이동 하는 성분에 대해서 약 0.5초 마다  $5^{\circ} - 10^{\circ}$  정도로 고속 운동한다. 이 성분은 주시 위치의 보정 작용과 함께 화상 정보를 공간적으로 샘플링 수용 처리한다.

추종 운동: 저속 이동 대상을 추적할 때 생기는 약  $30^{\circ}/s$ 이하의 저속 성분에 대해 망막 황점의 중심부에 대상 물체를 유지시키는 역할을 한다.

집중·전개 운동: 깊이 방향의 물체를 주시 할 때 발생하는 양안의 역 방향 회전 운동 성분에서 초점 조절 운동과 연동한다.

융상 운동: 집중 운동 중에 양안 중심부에 대상 물체를 유지하는 미세한 성분의 운동. 안정한 단일 입체시를 성립시키기 위해서 필요하다.

고시 미동: 대상 물체를 고시하고 있을 때 발생하는 불규칙한 미소 운동 성분으로 tremors, drifts, microsaccades 3 종류의 성분이 관찰 된다. 망막의 시세포 밀도에 따른 샘플링 이론에 의한 시력의 공간 분해능은 약 2 arc min 정도이나 실제로는 정상 시력(Snellen 시력 1.0)을 가진 사람의 경우 1 arc min 이다. 이것은 안구의 미소 움직임과 고도의 신경 신호 처리를 거쳐 시세포 밀도에 의한 나이키스트 샘플링 한계를 뛰어 넘는 공간 해상도를 향상 시키는 것으로 알려져 있다.<sup>[45]</sup> 참고로 cone 시세포 1개의 angular size는 약 0.5 arc min, 안구의 초점거리는 약  $f = 17$  mm 이고, airy disk scan에는 최소 5 개의 시세포가 요구된다.

## 1.4 명암과 색 신호 기구

### 1.4.1 비시감도 (spectral luminous efficiency functions)

명암 자극으로 지각되는 휘도 범위는  $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ cd/m}^2$  범위의 암소시에서는 간상 세포가,  $10^1 \sim 10^5 \text{ cd/m}^2$  범위의 명소시에서는 원추 세포가 주로 동작한다. 이들 중간 범위  $10^{-1} \sim 10 \text{ cd/m}^2$  영역을 박명시(mesopic vision)라 하며 양 세포가 분담하고 있다.

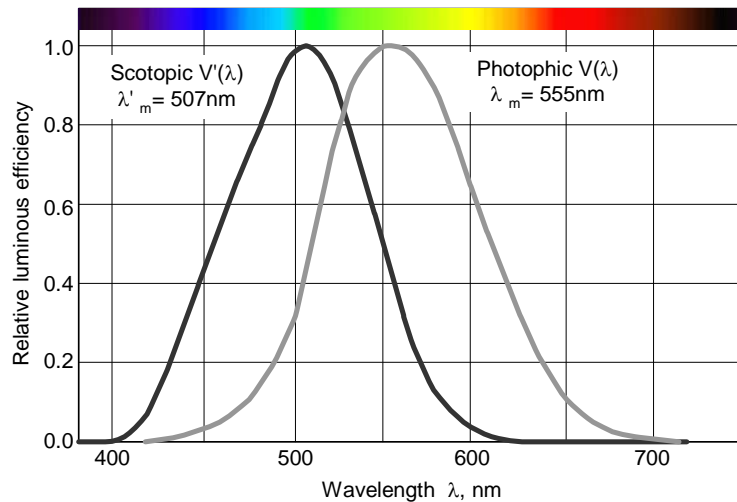


그림 1.9 비시감곡선,  $V(\lambda)$ : 명소시(photopic vision)  $V'(\lambda)$ : 암소시(scotopic vision).<sup>[8]</sup>

파장 380 nm ~ 780 nm 사이의 가시광 범위에서 등강도 색광에 대한 밝기, 즉 비시감도에 차이가 있다. 그림 1.9에서와 같이 암순응 비시감도  $V'(\lambda)$ 에서는 507 nm, 명순응 비시감도  $V(\lambda)$ 에서는 555 nm 에서 최대 감도의 비시감 곡선이 얻어 진다.

### 1.4.2 Weber(-Fechner)의 법칙<sup>[9]</sup>

밝은 영역에서 명암의 변별 능력이 우수하나 어두운 곳에서는 명암의 변별 능력이 다소 떨어진다. 그러나 일상 생활에서의 밝기 범위인  $10 \sim 10^3 \text{ cd/m}^2$  에서는 배경 휘도  $L$ 에 대한 명암 차이가 변별 가능한 최소 휘도 변화량  $\Delta L$ 과의 비가 그림 1.10에서와 같이  $\Delta L/L$  이 약 1.3%로 거의 일정하다. 이를 Weber(-Fechner)의 법칙이라 한다.

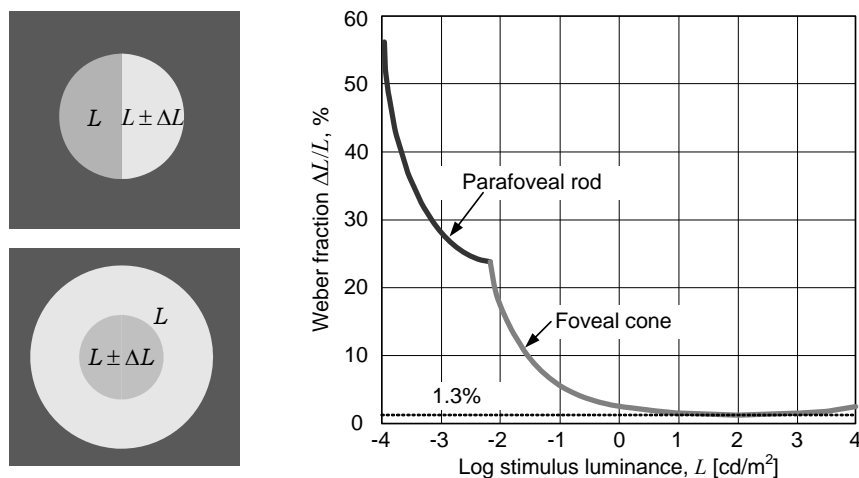


그림 1.10 Weber-Fechner fraction.<sup>[9]</sup>



### 1.4.3 색 정보 처리

색 지각 이론에는 (a) 독립인 3색 신호가 기본이 되는 3색설, (b) 서로 독립인 2색 신호의 조합으로 구성되는 3색설이 있다. 시각계에서는 두 이론에 의한 색신호 처리를 각 레벨에서 단계적으로 행하는 그림 1.11에서와 같은 기구로 되어 있는 것으로 모델링하고 있다.<sup>[10]</sup>

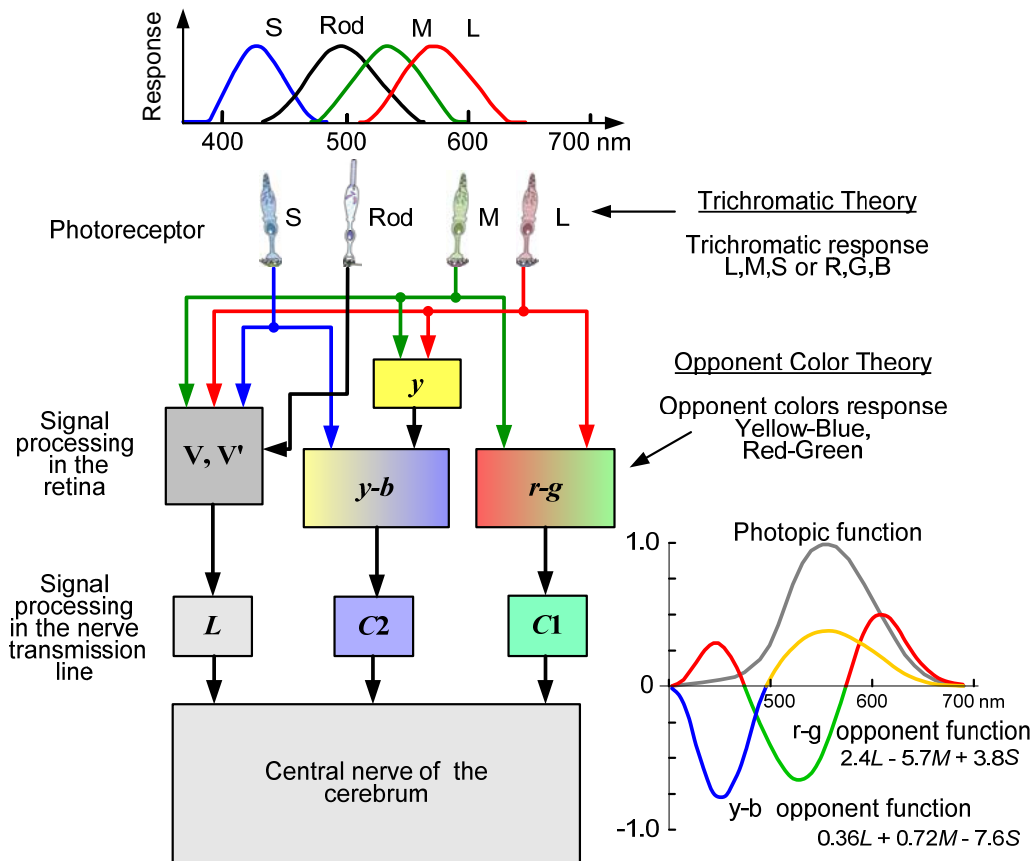


그림 1.11 시각계에서의 색지각 기구의 모델.<sup>[10]</sup>

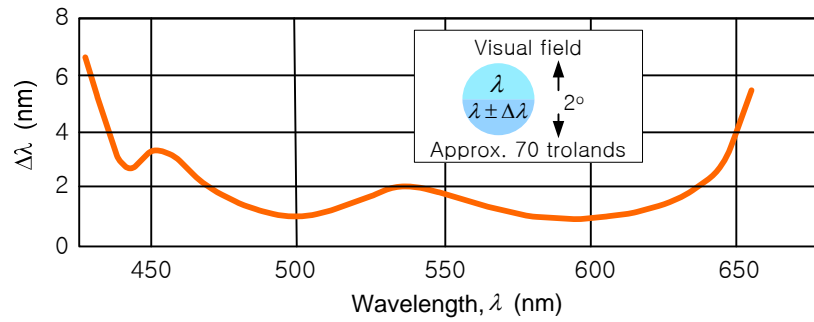
### 1.4.4 파장 변별 특성

색 정보의 변별에는 3변수, 즉 색상, 채도, 명도가 관계한다. 색상은 청록색 (490 nm), 등색 (590 nm) 근방의 색에서는 1 nm 파장 차이도 구별이 되나 가시광 전역에 대해서는 2 ~ 3 nm 정도의 파장 차이를 구별 가능하다.

### 1.4.5 채도 변별 특성

채도(색 농도)는 460 nm 이하의 청색 범위와 640 nm이상의 적색 범위에서는 40단계 정도를 구분하나 570 nm 부근의 황색에서는 6단계 정도 구분이 가능하다.

그림 13은 단일 파장의 색광에 백색광을 가법 혼합시켜 채도를 변화시켰을 때, 채도 변화를 감지하는 최소 혼합량을 파장별로 나타낸 것이다. 이 그림에서 570 nm 부근의 색은 백색과의 변별이 극단적으로 나빠 30 % 이상의 혼합량이 필요하다. 그러나 500 nm 이하 영역과 600 nm 이상의 영역에서는 1 % 정도의 혼합량으로도 채도 변별이 느껴진다.



5 1.12 파장 변별 특성 커브.<sup>[9]</sup>

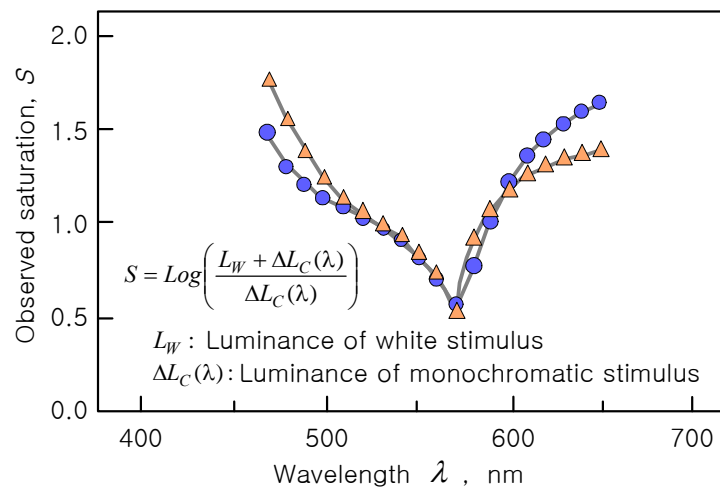


그림 1.13 Observed “saturation” (colorimetric purity) discrimination data.<sup>[11]</sup>

#### 1.4.6 Bezold-Brücke Hue Shift(Hue changes with luminance)

단색광의 휘도 성분만을 변화 시킬 때, 색의 색상이 달라져 보이는 현상을 Bezold- Brücke 현상이라 한다. 그러나 470 nm, 510 nm, 575 nm의 색과 500 nm의 보색은 이 때에도 일정하게 보이며 이들을 unique 색이라 한다.

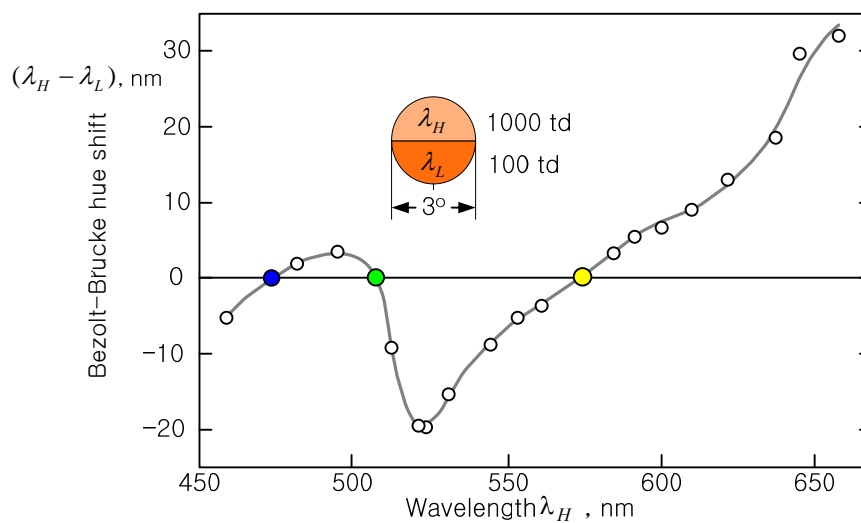


그림 1.14  $\lambda_H$  에 따른 Bezold-Brücke shift ( $\lambda_H - \lambda_L$ ).

그림 1.14에 이 현상의 실험 결과를 보였다.<sup>[12]</sup> 이 그림에서는 망막상의 조도를 1000 td에서 100 td로 감소시켰을 때, 단색광의 색상의 변화량을 파장 차이로 나타내었다. 여기서 td는 망막상의 조도  $T$ 의 단위를 나타내는데 troland의 약자이다. 망막상의 조도  $T$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$T = L \cdot p, [\text{td}]$$

여기서  $L$ 은 photopic luminance(휘도)로써 단위는 nits, 또는  $\text{cd/m}^2$  이고,  $p$  는 pupil area(동공의 면적)로써 단위는  $\text{mm}^2$  이다. 예를 들면, 100 nits의 휘도를 갖는 물체를 볼 때, 동공의 직경  $d = 4.2 \text{ mm}$  이면, 동공의 면적  $p = 14 \text{ mm}^2$  이므로 망막상의 조도는 1400 td 이다.

#### 1.4.7 Abney Effect(Hue changes with colorimetric purity)<sup>[13]</sup>

색상을 유지하면서 채도를 저하시키면, 겉보기 색이 yellow (570 nm)와 자색(560 nm의 보색)쪽으로 쉬프트되어 보이는 현상을 말한다. Bezold-Brücke 현상으로부터 blue(450-475 nm), green (500-520 nm), yellow (570-580 nm), violet (540-560 nm)의 보색 영역의 색은 제시 조건에 영향을 받지않고 안정된 기본 색이 된다.

주파장이 일정한 색광으로 채도를 변화시킬 때 색상이 변화하는 양상은 그림 1.15에서와 같이 xy 색도도 중앙의 백색 점으로 향하는 곡선 군으로 나타난다. 이 그림에서는 Munsell 색표의 명도 ( $V/$ )를 2에서 9까지 변화 시킨 경우의 등색상 좌표점의 궤적을 나타내고 있다.

#### 1.4.8 Helmholtz-Kohlrausch Effect (Brightness depends on luminance and chromaticity)<sup>[14]-[16]</sup>

동일 휘도의 색으로써 고채도의 색이 되면 밝게 느껴지는 현상을 말한다. 그림 1.16에는 백색광 D65와 밝기가 같게 느껴지는 색광의 휘도를 구하고, 그 역수 값이 같아지는 궤적을 나타낸 것이다. 그 결과 blue와 red 영역의 고채도 색들은 상기 현상에 의한 영향이 특히 크게 나타남을 알 수 있다.

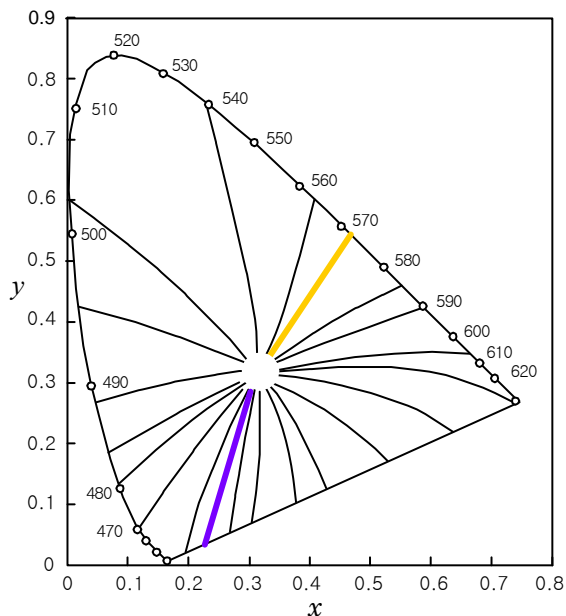


그림 1.15. Abney 현상.

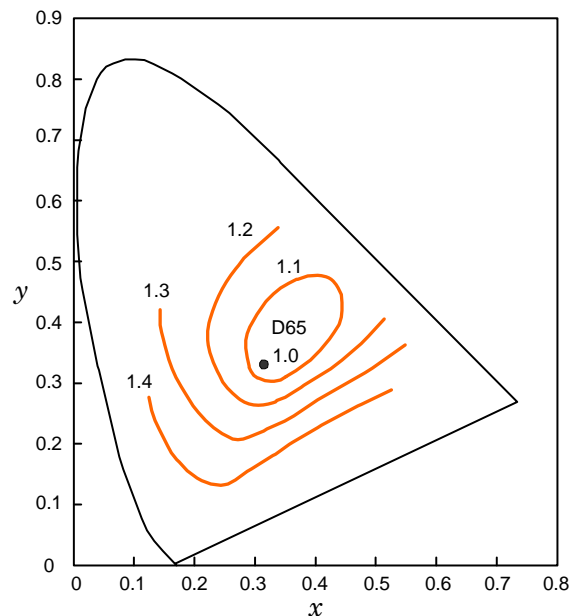


그림 1.16 Helmholtz-Kohlrausch 현상.

## 1.5 시각계의 시공간적 특성<sup>[17]</sup>

### 1.5.1. 시각의 공간 주파수 특성

시각계의 공간 주파수 특성 (MTF, Modulation Transfer Function)은, 안구 결상계에서는 저역 통과형, 신호 형성계 이후에서는 대역 통과형으로 변화하며 공간 정보를 미분 처리한 후에 전달하는 시스템으로 되어 있다. MTF는 다음과 같이 제시 조건등에 따라서 영향을 받는다.

#### (1) 평균 휘도

디스플레이의 표시 평균휘도가  $10 \sim 300 \text{ cd/m}^2$  범위의 명소시에서는 그림 1.17(a)에서와 같이  $3 \sim 5 \text{ cpd}$  (cycles/degree)에 최대 감도를 가지며, 약  $50 \text{ cpd}$ 까지의 해상력(시력 1.5 해당)을 가지는 band pass형 MTF특성을 나타낸다.  $10^{-1} \text{ cd/m}^2$  이하의 암소시에서는 저역 통과형 MTF가 되며 시력에 대응하는 해상 한계 주파수도 저하 한다.

#### (2) 주위 휘도

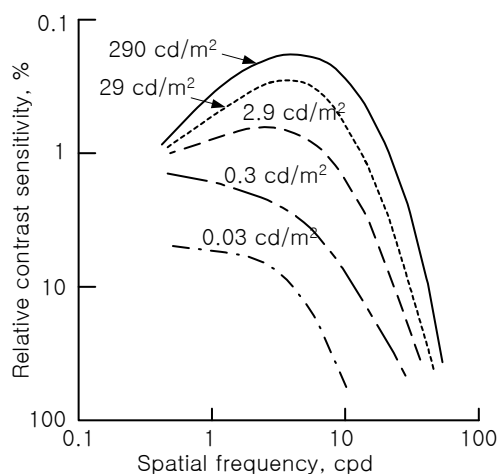
그림 1.17(b)에 보인 것과 같이 테스트 패턴 부분과 그 주위의 휘도차가 크면 저·중역 공간 주파수에서 콘트라스트 변별력이 저하하는데 특히 주위 휘도가 높을 경우 현저하다.

#### (3) 관찰 거리

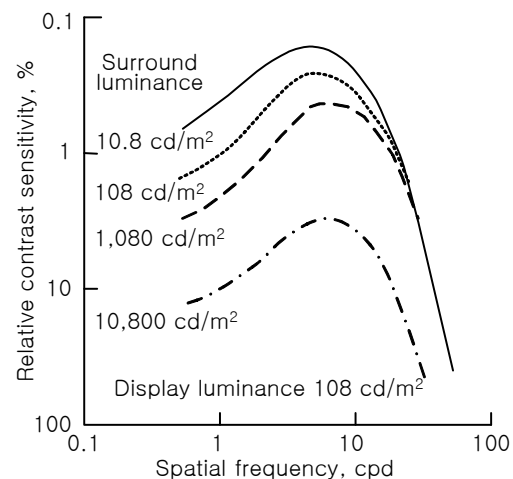
거리에 따라 결상계 조절 기구가 변화하여 MTF에의 영향이 예상되나 그림 1.17(c)에서와 같이 그 변화량은 작다.

#### (4) 화각(Field of picture)의 영향

화각에 따른 공간 주파수 특성은 그림 1.17(d)에서와 같이 화각의 증대에 따라 전체적으로 감도가 상승하면서 최대 감도 주파수가 저역쪽으로 이동한다. 화각  $60^\circ$ 이상에서는 더 이상 변화가 없다.

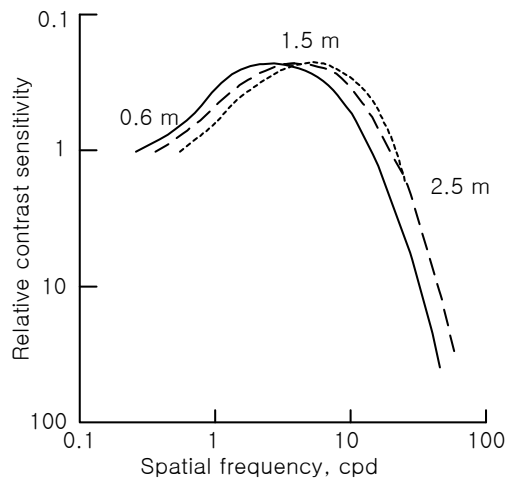


(a) 화상의 평균 휘도의 영향

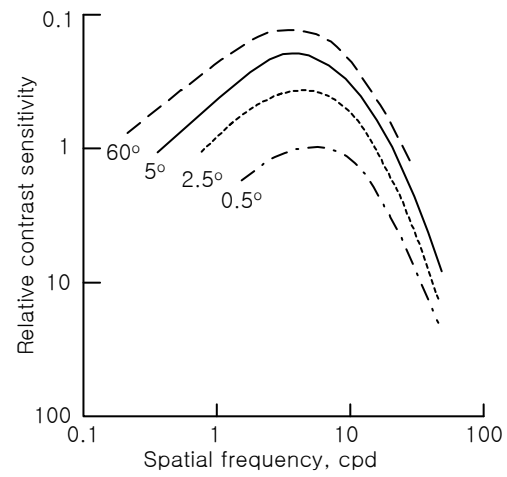


(b) Surround 휘도의 영향

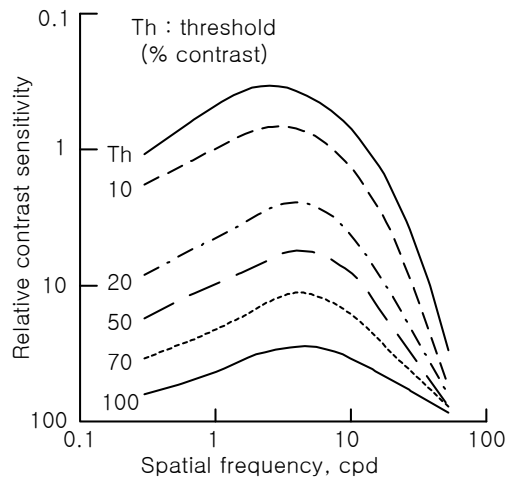
그림 17. 제시 조건에 따른 시각의 공간 주파수 특성: (a) 화상의 평균 휘도의 영향: (b) Surround 휘도의 영향: (c) 관찰 거리의 영향: (d) 화각의 영향: (e): 화상의 물리적 콘트라스트의 영향: (f) 방향성의 영향: (g) 파장에 따른 영향: (h) 순응 효과: (i) 색대의 영향



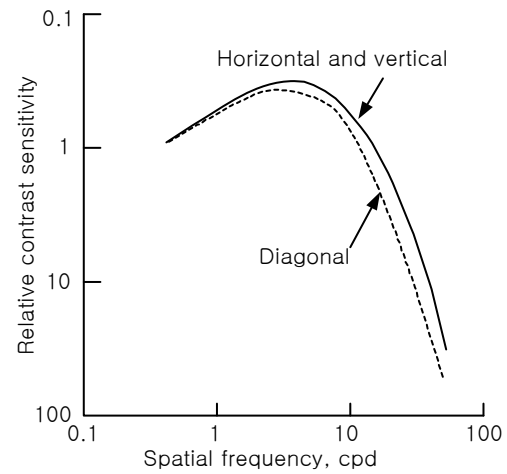
(c) 관찰 거리의 영향



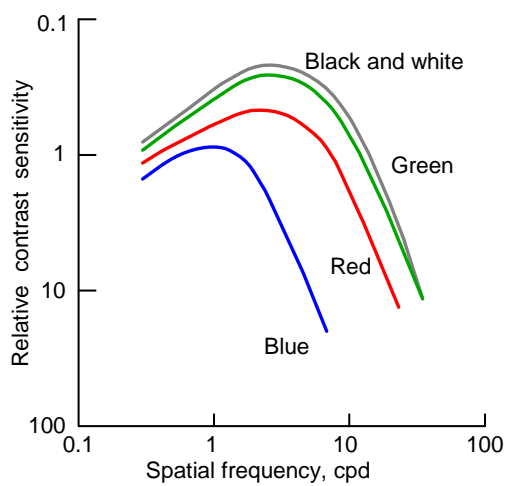
(d) 화각의 영향



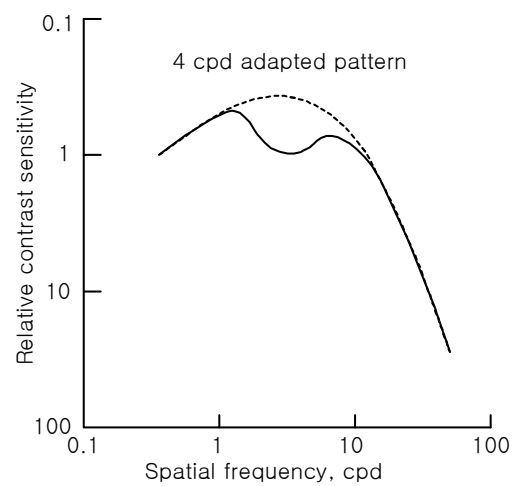
(e) 화상의 물리적 콘트라스트의 영향



(f) 방향성의 영향



(g) 파장에 따른 영향



(h) 순응 효과

그림 1.17. (계속)



## (5) 화상의 물리적 콘트라스트의 영향

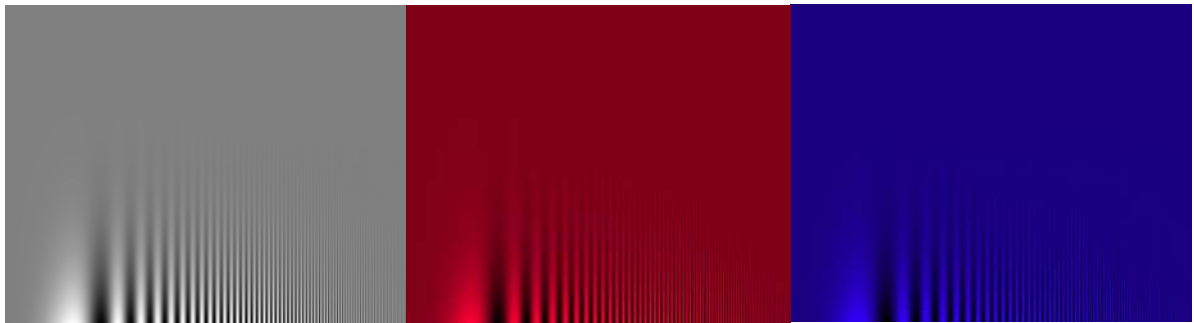
화상 자체의 물리적 콘트라스트가 높으면 시각 자체의 콘트라스트 감도는 저하하고, 화상의 물리적 콘트라스트가 낮으면 시각의 콘트라스트 감도는 높아진다. 이 특성을 그림 1.17(e)에 보였다.

## (6) 방향성의 영향

패턴 줄무늬의 방향에 따라 변별특성이 변화하며, 그림 1.17(f)에 보인 것과 같이 수평, 수직방향 보다  $45^\circ$  기울어진 경사무늬의 경우, 고역에서 미약한 감도 저하가 일어난다. 이것은 안구 광학계의 이방성 때문보다는 신경계에서의 처리 특성에 관계한다.

## (7) 파장에 따른 영향

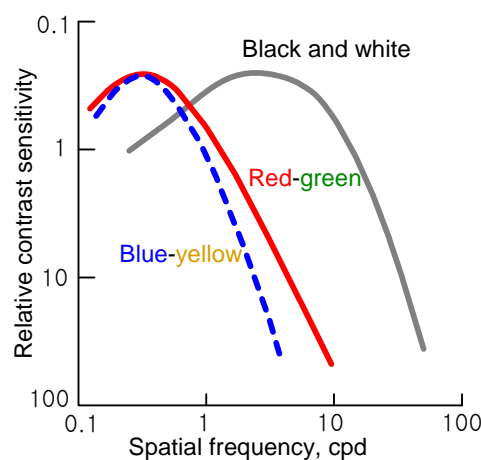
파장에 따른 시각의 공간 주파수 특성은 그림 1.17(g)에서와 같이 green 대역에서 감도가 높고, green보다 파장이 길거나 짧아지면 감도 저하가 일어나면서 피크를 이루는 공간 주파수가 저역 쪽으로 이동된다. 특히 파장이 짧아지는 blue 쪽이 파장이 긴 red 쪽 보다 감도 저하가 심하다.

(8) 순응 효과<sup>[18]</sup>

특정 공간 주파수의 패턴을 제시하여 순응 시킨 후에 MTF를 측정하면 순응 주파수 부근 1 옥타브 폭 내에서 감도 저하를 일으킨다. 그림 1.17(h)는 4cpd의 패턴에 순응된 후의 공간 주파수 특성을 나타낸 것이다.

## (9) 색대의 영향

휘도차가 없는 색대 패턴에서는 공간 주파수 0.3 cpd 근처에서 피크를 이룬다. 색 조합에서는 그림 1.17(i)에서와 같이 적-록의 쪽이 황-청쪽 보다 고역의 감도가 우수하다.



(i) 색대의 영향

그림 1.17 (계속)

1.5.2. 영상 신호의 대역폭<sup>[19],[20]</sup>

그림 1.18은 명암 공간 주파수 및 색채의 공간 주파수 패턴을 NTSC 컬러 텔레비전 규격 (field 주파수 60Hz, 스캔 라인 수 525 라인)으로 비디오 신호로 변환했을 때의 시간축 주파수를 함께 나타낸 것이다. 이 그림에서 당연한 결과지만 휘도 신호 대역보다 색채 공간 주파수의 대역이 좁음을 알 수 있다. 컬러 텔레비전 시스템에서 색신호의 대역을 휘도 신호 대역 보다 비례적으로 좁게 설정하는 이유가 여기에 있다. 즉, 그림 1.18에서 휘도 신호의 대역폭을 4.2 MHz로 하는 경우 상대 감도가 약 -12dB이므로 동일한 감도의 red-green 색 신호(I 신호)의 대역은 약 1.2 MHz, yellow-green 색 신호(Q 신호)의 대역은 약 0.6 MHz로 정해 짐을 알 수 있다. 같은 원리로 HDTV의 경우에는 휘도 신호 대역폭을 20 MHz로하고 색신호의 대역은 휘도 신호의 약 1/4인 5 MHz로 한다. 따라서 디지털 샘플의 경우 휘도 신호 Y와 두 색차 신호 R-Y 및 B-Y 신호의 샘플링 레이트의 비는 4:1:1로 한다.

그림 1.19에는 정지 및 운동 공간 정현파 패턴에 대한 시각계의 MTF를 나타낸 것이다. 이 그래프의 아래쪽에는 텔레비전 시스템 설계를 위한 공간 주파수에 대응하는 시간 주파수를 함께 나타내었다. 그림 1.19에서 이동시의 공간 주파수의 감도가 정지시의 것 보다 낮고 피크치도 저역쪽으로 치우쳐짐을 알 수 있다. 이러한 원리에 기초하여 디지털 HDTV 시스템에서는 정지 영상 영역의 대역 폭은 넓게(약 20 MHz)하고, 동영상 영역의 대역폭은 좁게 한다.

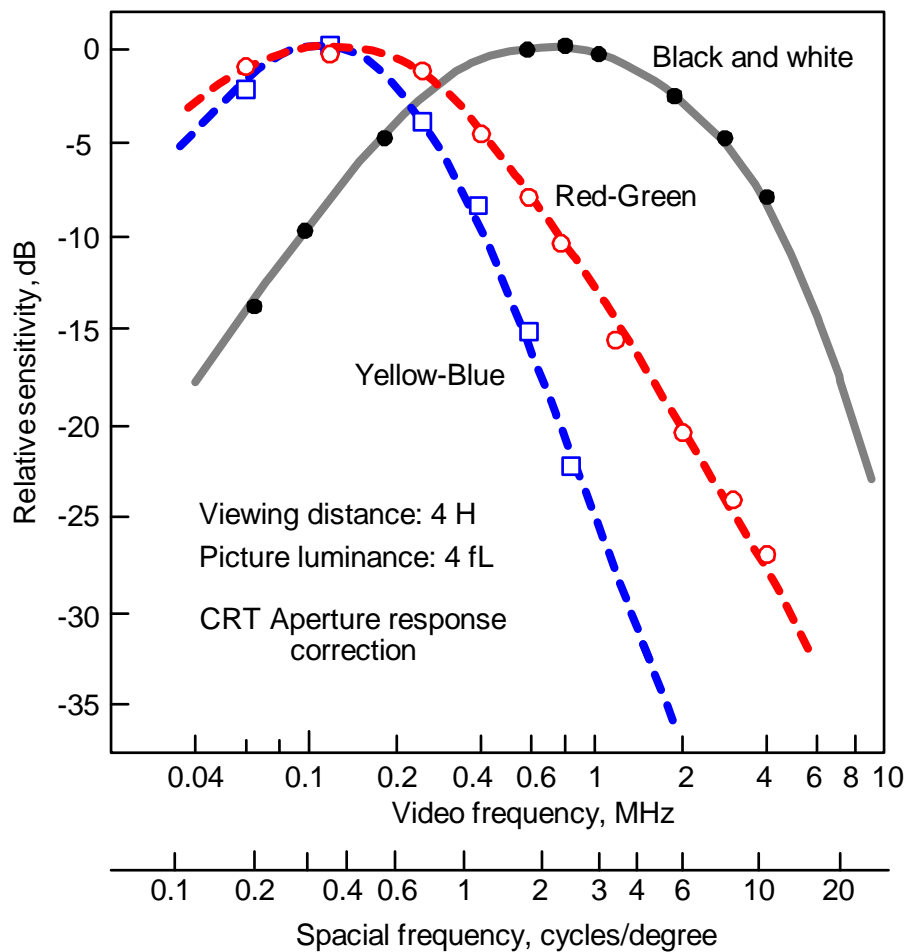


그림 1.18 색도 및 명암의 공간 주파수 특성과 비디오 신호의 대역폭의 일례.

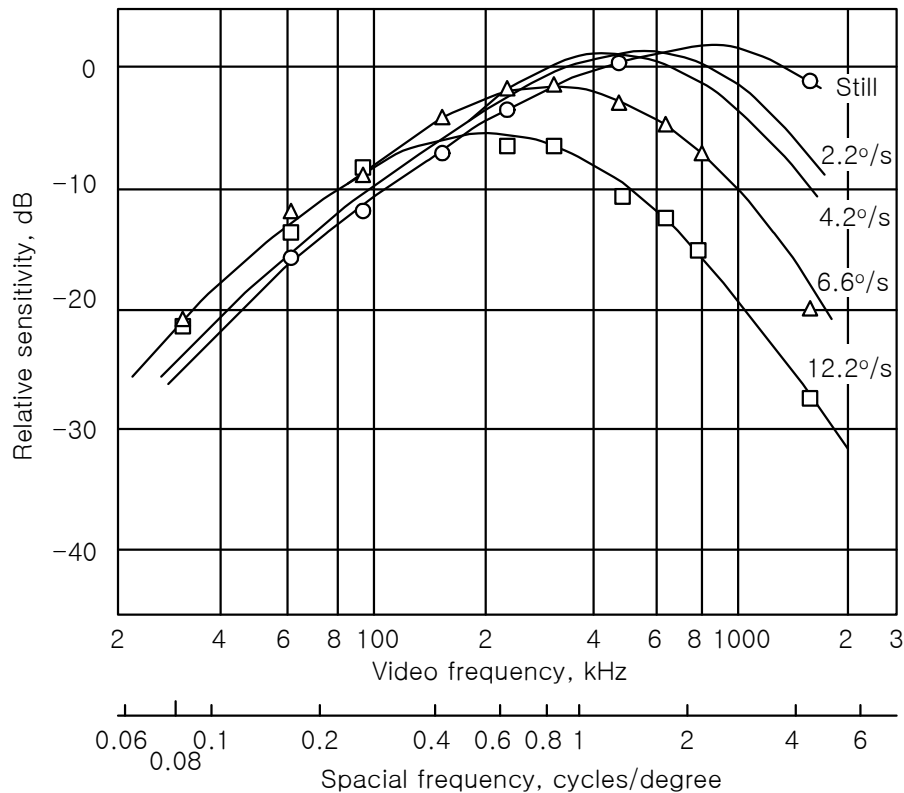


그림 1.19 정지 및 운동 공간 정현파 패턴에 대한 시각계의 공간주파수 특성 (변별 문턱치).

### 1.5.3. 시야의 정보 수용 특성

망막내의 각 영역별로 정보 수용 특성은 다르다. 그림 1.20에서 나타낸 시야의 영역 별 정보 수용 특성은 다음과 같다.<sup>[21]</sup>

- A: 변별 시야라 부르며 시력 0.5 이상의 시기능이 우수한 범위로 시야 각이  $3^\circ$  이내이다.
- B: 유효 시야라 하며, 시력 0.1 정도 이고, 안구 운동만으로 주시하여 순시에 정보 수용 가능한 범위로 좌우  $\pm 15^\circ$ , 상  $8^\circ$ , 하  $12^\circ$ 의 범위이다. 안정 주시 시야는 좌우  $30^\circ \sim 45^\circ$ , 상  $20^\circ \sim 30^\circ$ , 및 하  $25^\circ \sim 40^\circ$ 의 범위이다.
- C: 유도시야, 제시된 정보의 존재를 인식할 정도의 식별 능력만 있으나 공간 좌표계에 영향을 주는 시야로써 좌우  $\pm 50^\circ$ , 상  $35^\circ$ , 하  $50^\circ$ 의 범위이다.
- D: 보조시야, 수평  $100^\circ \sim 200^\circ$ , 수직  $85^\circ \sim 130^\circ$

HDTV의 경우 디스플레이 상에서 임장감을 얻기 위해서 상기의 유도 시야인 C 영역을 충분히 포함 하면서 기존의 영화 필름의 종횡비를 고려하여 16:9로 정한 것이다. 따라서 디스플레이의 종횡비가 16:9 인 것이 중요한 것이 아니라, 표준 시청거리에서 망막 상의 유도 시야를 충분히 채울 정도로 디스플레이의 크기가 커야 시청자는 감동적인 reality를 느끼게 되는 것이다.

소위 임장감(the sense of reality and presence) TV의 조건은 첫째, 인간 시각의 한계 해상도(시력 2.0 이상)를 초월하는 화소 밀도, 둘째, 유도시야를 충분히 커버하는 디스플레이 크기(시야각  $60^\circ$  이상), 마지막으로 scene의 촬영 내용이다.

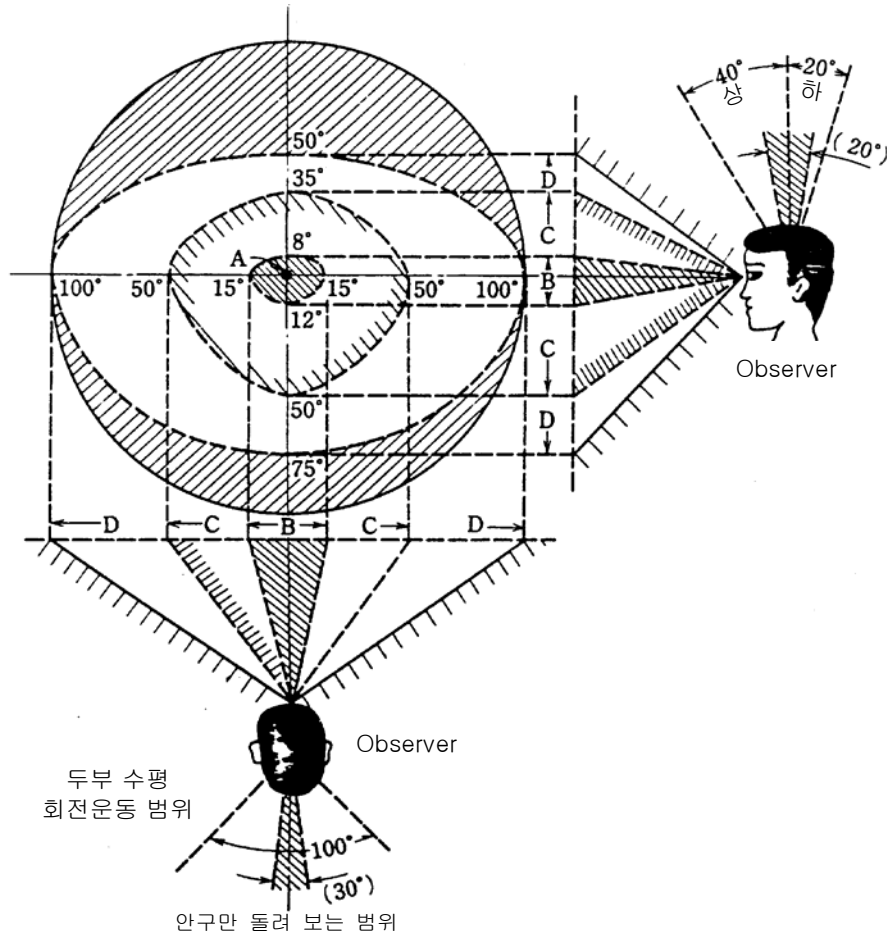


그림 1.20 시야 (field of view)내의 정보 수용 기능 특성.<sup>[21]</sup>

상기 3가지 조건을 갖추면, 별도의 안경이나 장치가 필요 없이 생생한 입체감과 원근감을 느낄 수 있으며, 심지어 한쪽 눈으로만 보아도 입체감을 느끼며 또한 현장에 실제 가서 존재하는 느낌을 받는다. 따라서 카메라가 움직이면서 촬영하면 시청자 자신이 직접 움직이는 것과 같이 느끼게 된다. 시각 뿐만 아니라 시청자의 의자 자세를 영상의 내용에 맞추어 미세하게 약간만 변화시키면 청각기관의 자세 센서까지 자극하면 완벽한 입장감을 느끼게 된다. 이것이 차세대 display UDTV이다.

## 1.6 Temporal properties of human visual system

### 1.6.1 Temporal summation (integration effect)

시각상이 성립 하기 위해서는 일정한 시간이 필요하며 순시에 되지 않는다. 그러나 일단 시각상이 성립하면 상이 사라져도 잠시동안 반응이 지속된다. 한편, 광을 감지하는 능력에는 범위가 있으며 그 하한 값을 광 문턱치 (light threshold)라 한다.

이 광 문턱치를 결정하는 광의 세기  $I$  와 지속 시간  $t$  사이에는

$$I \cdot t = K \quad (1.1)$$

인 상보적인 관계가 있다. 이를 Bloch의 법칙이라 한다. 단 이 법칙이 성립하는 조건은 광의 지속시간이 10 ~ 100 ms 이하이다. 이 이상이 되면 상보적 관계가 성립하지 않고 특히 지속시간이 250 ~ 1000 ms 이상 되면 광 감지 능력은 지속시간에는 무관하며 광의 세기 만에 의해 결정된다.

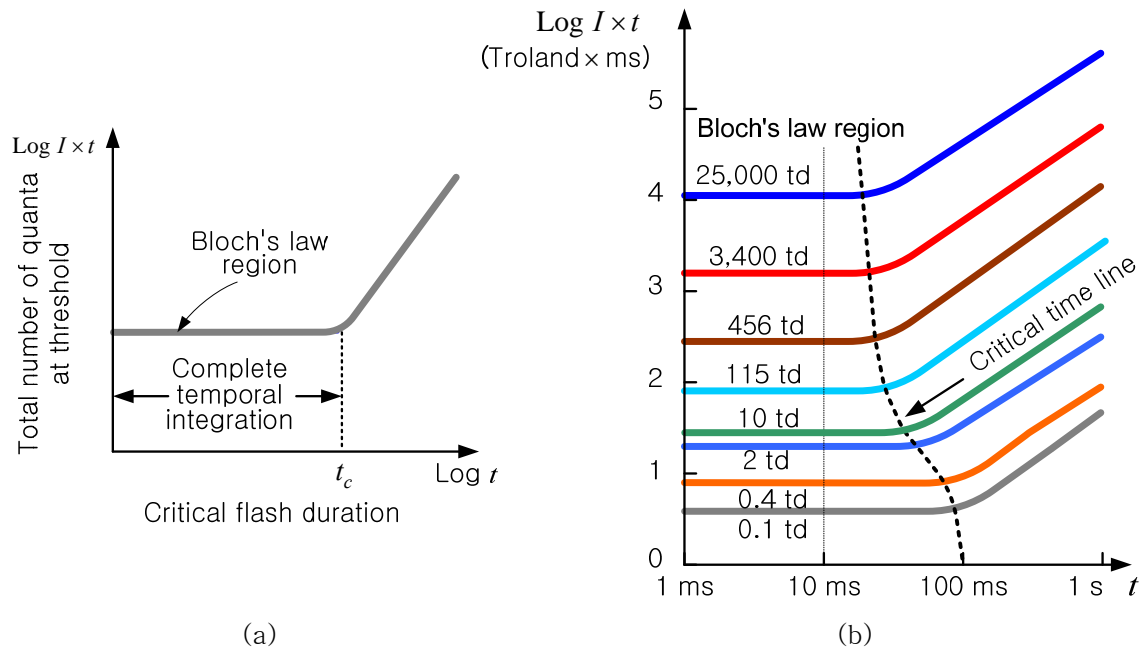


Fig. 1.21 (a) Classic expression of Bloch's law regarding temporal summation. (b) Luminance-duration versus time curves for 1 degree foveal test spot on different backgrounds. Bloch's law holds when the gradient of the line is zero. Integration time (critical duration) can be determined from above. Beyond critical duration, Bloch's law breakdowns (when the gradient is greater than zero). Kahneman and Norman's data from Hart Jr, W. M., The temporal responsiveness of vision. In: Moses, R. A. and Hart, W. M (ed) Adler's Physiology of the eye, Clinical Application. St. Louis: The C. V. Mosby Company, 1987.

## 1.6.2 명암의 시간 주파수 특성

일반적으로 시간 주파수 특성을 측정하는 명암 패턴은 다음과 같다.

$$A(t) = A_0(1 + m \cos 2\pi ft) \quad (1.2)$$

여기서  $A_0$ 는 평균 휘도,  $m$ 은 변조도  $f$ 는 주파수이다. 실험 방법은 상기 패턴에서 시간 주파수  $f$ 를 일정하게 하고 변조도  $m$ 을 변화시킨 경우의 변별 임계치를 구하는 경우와,  $m$ 을 고정 시키고  $f$ 를 변화시킨 경우의 임계치를 구하는 두 가지가 있다. 전자는 시각계의 전달함수, 즉 시간주파수 특성이고 후자는 임계융합 주파수 (critical fusion frequency 또는 critical flicker frequency: CFF) 특성이다.

그림 1.22는 Kelly<sup>[22]</sup>가 시야각이 65°인 전백색 시험 화면을 사용하여 시각계가 적응된 밝기 (adaptation level)  $T_0$ 에 따른 임계 변조도와 CFF를 구한 것이다. 그림에서 휘도가 높을 경우에는 10 ~ 20 Hz에서 최대 감도를 갖는 대역 통과 특성을, 그리고 휘도가 낮아지면 저역 통과 특성을 가진다.

그림 1.23은 De Lange가 정현파형이 아닌 주기 신호에 대한 임계 변조도와 CFF의 관계를 구하기 위해 시각 2°인 경우에 대해 명암의 시간 주파수 특성을 측정한 것이다.<sup>[23]</sup> 또한 10 Hz 이상의 주파수에서는 정현파가 아니더라도 Fourier 급수 전개시의 기본파의 변조도에 의해서 CFF가 결정된다.



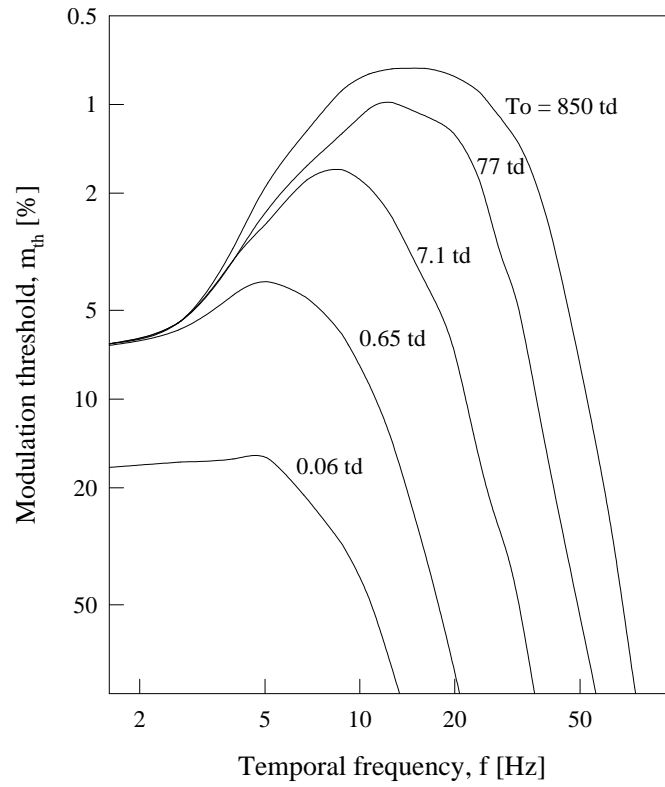
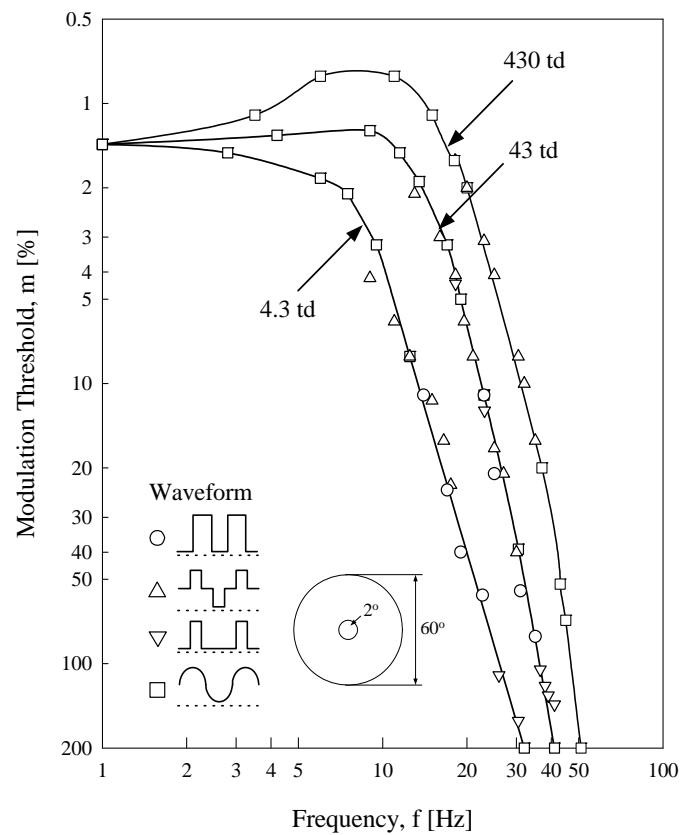


그림 1.22 Kelly (1961)의 임계 변조도 곡선.

그림 1.23 De Lange (1958)의 임계 변조도 곡선.<sup>[23]</sup>

### 1.6.3 명암의 임계 융합 주파수 특성<sup>[17]</sup>

CFF 특성은 망막상의 위치와 시표의 크기에 따라 달라진다. 그림 1.24 및 25는 HDTV 개발 시에 일반적인 텔레비전 시청 조건에서 플리커 특성을 조사한 것이다.<sup>[19]</sup> 그림 1.24에서와 같이 시표가 작은 경우에는 망막의 중심부에서 CFF가 가장 높으나, 시표가 크게 되면 망막의 주변부 쪽으로 최대 감도가 옮겨간다. CFF치는 관찰자의 연령, 시선의 상태, 좌우 시력 차이 등 여러 요인에 의해 다소 달라진다.

한편, 그림 1.24에서 망막의 중심부에서부터 주변부로 갈수록, 또한 밝을수록 CFF가 높아짐을 알 수 있다. 따라서 디스플레이 면적이 넓어지고 또한 화면이 밝을수록 TV의 디스플레이 화면수(field, 또는 frame)수를 올려야 시각적으로 플리커를 덜 느낄 것이다. 특히 PC 모니터와 같이 크기는 작더라도 50 cm 정도의 근거리에서 볼 때는 시야 각이 약 60도 정도로 넓다. 따라서 CRT 모니터의 경우 프레임 주파수를 70 Hz 이상으로 해야만 하는 이유도 그림 1.24로부터 알 수 있다.

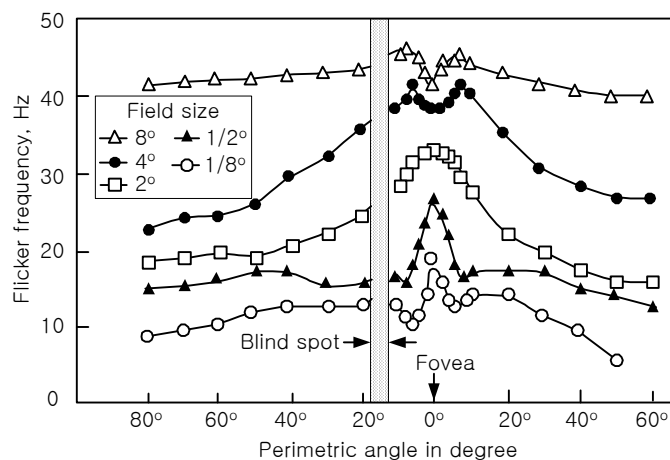


그림 1.24 망막 위치 및 시표 크기에 따른 CFF의 변화 (시표는 평균 휘도  $3 \text{ cd/m}^2$ 의 정현파 변조, 배경은 black 상태).

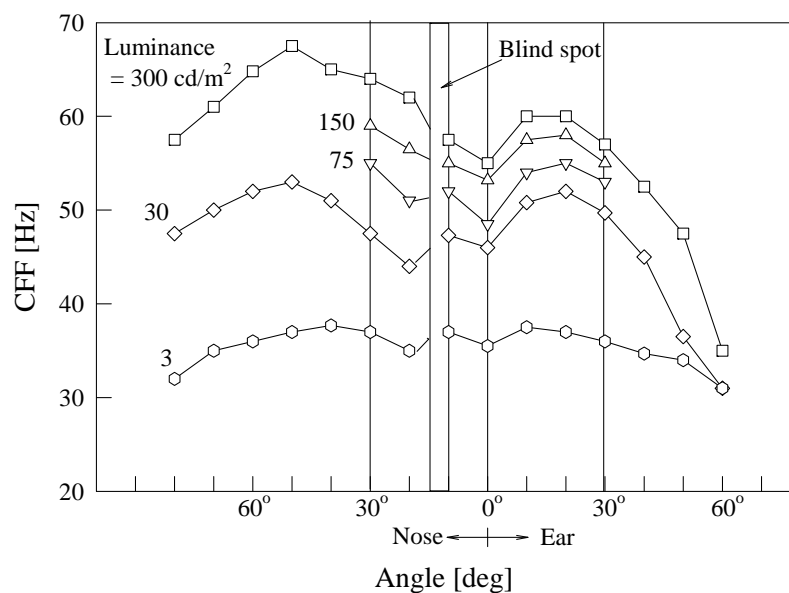


그림 1.25 망막 위치에 따른 CFF(critical flicker frequency)의 변화 (시표의 크기: 시각  $16^\circ$ , 배경 휘도: 시표 휘도의  $2/3$ ).

시세포 만의 휘도에 따른 CFF 특성은 그림 1.26에서와 같다. 휘도  $5\log \mu\text{mL}$  이하에서 동작하는 rod 시세포와  $5\log \mu\text{mL}$  이상에서 동작을 하는 cone 세포의 종합 특성은 그림 1.26에서와 같이 전체적으로 S자 형태를 가진다. 고휘도에서는 CFF가 60 Hz 근방이고 저휘도에서는 2~3 Hz 정도가 된다.

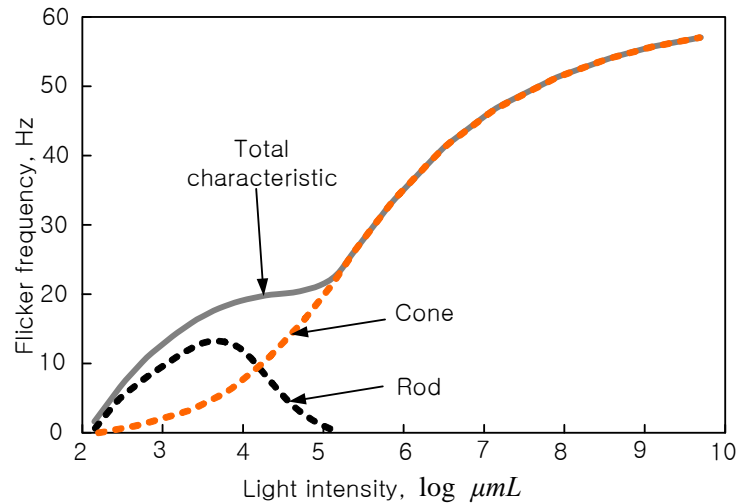


그림 1.26 휘도에 따른 시세포의 CFF 특성<sup>[24]</sup>

그림 1.26에서 휘도가 어떤 특정 범위 내에 있을 때, CFF는 다음과 같이 주어진다.

$$CFF = a \log L + b \quad (1.3)$$

$$CFF = c \log S + d \quad (1.4)$$

여기서  $a, b, c$ , 및  $d$  는 상수이고,  $L$  은 플리커 광의 휘도,  $S$  는 플리커 광의 면적이다. 상기 식 (1.2)는 Ferry-Potter법칙, 식(1.3)은 Granit-Harper 법칙이라 불린다.<sup>[17]</sup>

#### 1.6.4 색도의 시간 주파수 특성

색도에 대한 시간 주파수 특성은 명암의 경우와 마찬가지로 대역 통과 형태를 나타내며, 약 5Hz 에서 감도가 최대가 되며 대역은 명암 특성에 비해 좁다. 그러나 적·록의 조합의 경우와 황·청의 조합에서 공간 주파수 특성에서 보이는 것과 같은 차이는 없다. 다만 망막 위치에 따라 색광에 따른 감도가 다르기 때문에 시표의 크기에 따라 차이가 현저 해진다.

한편 1936년 Hetch 등<sup>[25]</sup>은 단일 파장에 대하여 망막상에서의 조도에 따른 CFF를 조사하는 실험을 하였는데, 실험 조건은 테스트 시각  $19^\circ$ , 배경 시각은  $35^\circ$ 의 경우에 대한 결과는 그림 1.27에서와 같다. 그림 1.27에서는 휘도가  $20 \text{ cd/m}^2$  이상에서는 빛의 파장에 관계없이 휘도 만에 의하여 CFF가 결정됨을 알 수 있다.

명암의 CFF에 대해서 휘도를 일정하게 하고 색상만을 주기적으로 변화시키는 경우의 임계 융합 주파수를 CCFF (critical chromatic flicker frequency) 라 한다. CCFF는 CFF의 수분의 일 정도이며, 명암과 색도의 시간 주파수 특성의 차이와 일치한다.

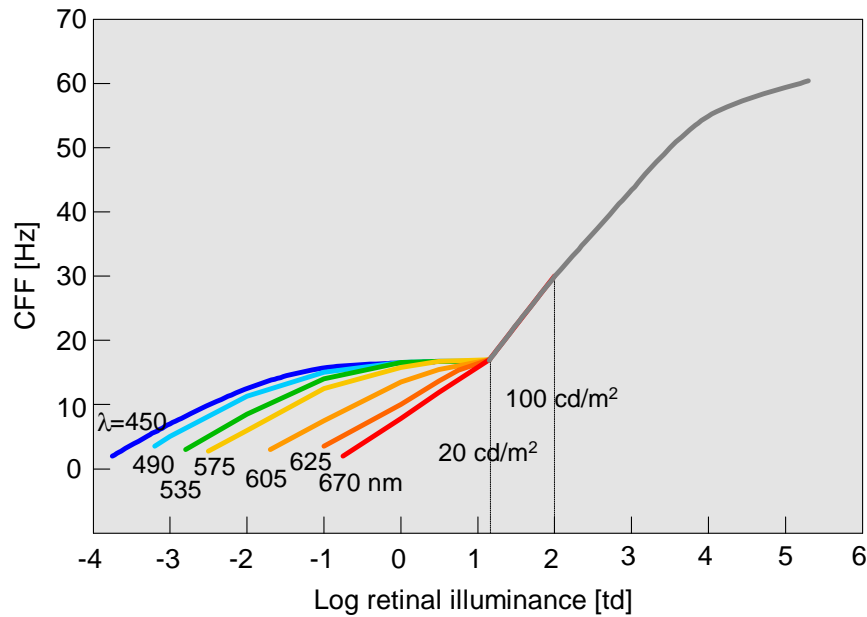


그림 1.27 빛의 파장과 밝기에 따른 CFF.

### 1.6.5 휘도 강조 효과

그림 1.28에는 발광 duty가 1:1인 경우, 명암의 duty가 7:2인 경우, 명암의 duty가 8:1인 경우에 대한 각 플리커 광의 상대 휘도에 따른 순간 최대 밝기 감각을 각각 나타내었다.

이 그림에서 임계 융합 주파수 이상의 플리커 광에 대해서 느끼는 밝기 감각은 플리커 광의 평균 휘도에 의해 느껴지는 밝기 감각과 일치한다. 이를 **Talbot-Plateau**의 법칙이라 한다.

한편, 임계 융합 주파수 이하의 플리커 광은 그림 1.28에서와 같이 Talbot-Plateau의 법칙에 의해 추정되는 밝기보다 밝게 감지 된다. 즉, 10 Hz 에서 감지되는 최대 밝기는 명암의 duty가 1:1인 경우에 Talbot-Plateau의 법칙에 의해 추정되는 밝기의 4배에 달한다. 이 효과를 **Brücke-Bartley effect** 또는 **휘도 강조 효과**라 한다.

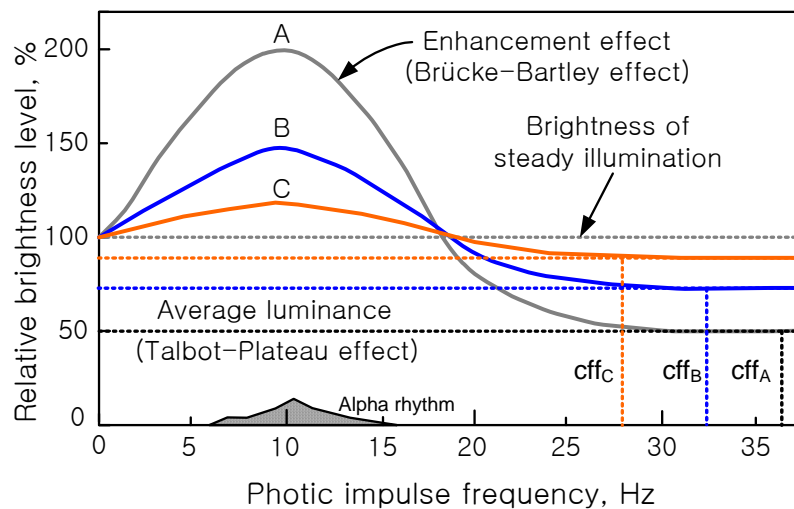


그림 1.28 플리커 광의 순간 최대 밝기 감각의 상대 휘도 (A; 명암의 duty가 1:1인 경우 B; 명암의 duty가 7:2인 경우 C; 명암의 duty가 8:1인 경우)<sup>[26]</sup>

### 1.6.6 시간적 과도 응답

#### (1) Broca-Sulzer effect

짧은 시간 동안 펄스적으로 빛을 발하는 flash 광을 볼 때의 밝기 감각도 그림 1.29에서와 같이 과도기에 휘도 강조 효과를 동반한다. 이 특성에서는 flash 광의 duration이 50 ms ~ 100 ms 사이에서 발생하며, 휘도가 높을수록 감각되는 밝기의 입상시간(rising time)이 빠르고 휘도 강조 효과도 크다. 이 현상을 Broca-Sulzer 효과라 한다.<sup>[27]</sup> 색광에 대해서도 마찬가지로 효과가 나타나며, 적, 록, 청의 순서로 입상 시간이 길어진다.<sup>[28]</sup>

#### (2) Benham's top illusion

백색광을 단속적으로 제시하거나, 그림 1.30에서와 같이 흑백 모양의 원판(Benham's top)을 회전시키면서 관찰하면 경계부분에 저채도의 색이 보인다. 이 현상은 자극광의 분광 특성으로부터는 예측 불가능하여 주관색, 또는 발견자의 이름을 따서 Fechner color라고도 한다. 왜 이런 현상이 생기는지는 확실히 밝혀져 있지 않으나 망막상에 있어서 3색의 색 처리 과정상 L 및 M시세포와 S 시세포의 반응시간 특성에 차이가 있어서 생기는 것으로 추정하고 있다.<sup>[29]</sup>

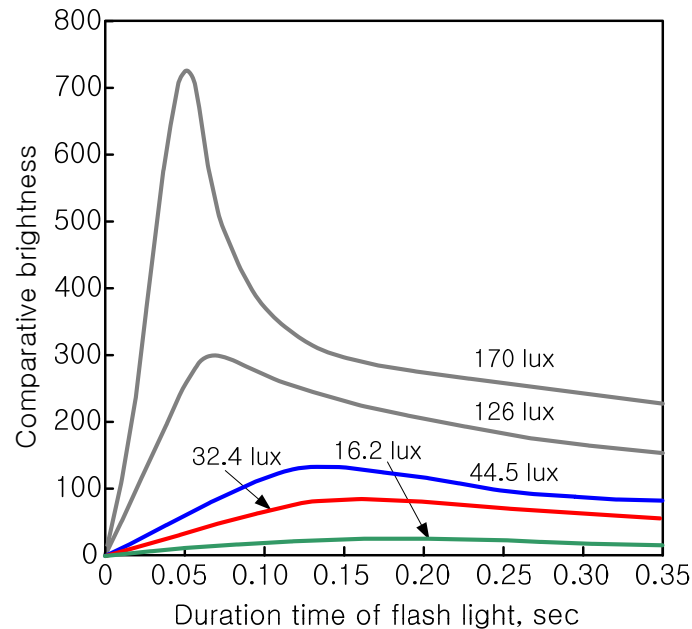


그림 1.29 Apparent brightness of flashes with various luminances, as a function of flash duration. 파라미터는 자극의 조도를 lux로 표시한 것임.

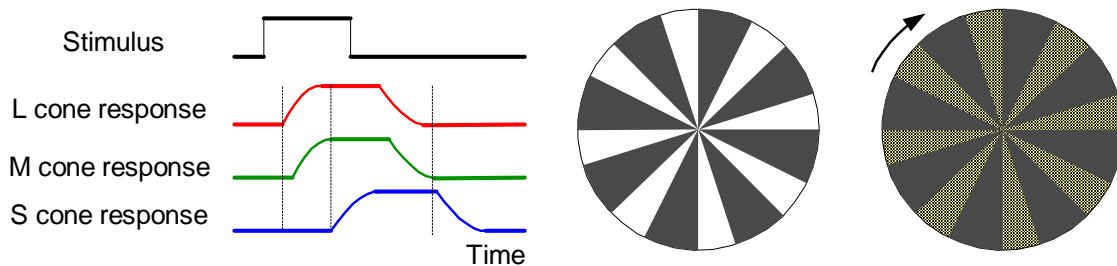


그림 1.30 Benham's top



### 1.6.7 시간적 요인이 관여하는 공간적 특성

#### (1) Dynamic visual acuity (동체 시력)

시표나 눈이 움직이고 있는 경우의 시력을 dynamic visual acuity라 한다. 시표의 운동 속도와 시력의 관계는 그림 1.31에서와 같이 일반적으로 소도가 빠를수록 시력은 저하 하지만,<sup>[30]</sup> 비교적 느린 속도에서는 오히려 정지시의 시력보다 향상하는 수도 있다.<sup>[31]</sup>

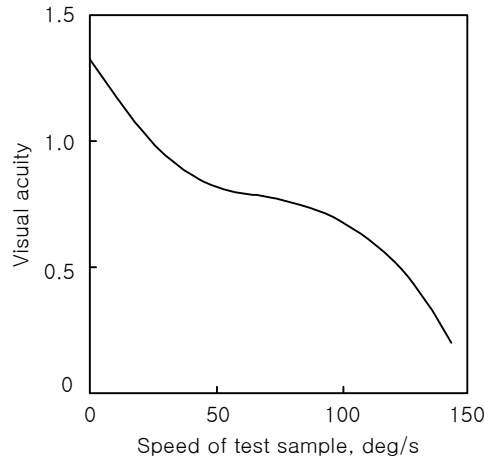


그림 1.31 시표의 속도와 시력의 관계<sup>[30]</sup>

#### (2) 제시 시간과 공간적 주파수 특성

그림 1.32는 Breitmeyer 등<sup>[32]</sup>이 구한 제시시간과 콘트라스트 문턱치와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 제시 시간이 짧으면 제시 시간과 콘트라스트 문턱치의 곱이 일정하고, 제시 시간이 일정치 이상이 되면 콘트라스트 문턱치는 제시시간에 관계 없이 일정한 값이 된다. 또한 문턱치가 일정하게 되는 제시시간은 공간 주파수에 따라서 150~200 ms 정도로 약간 달라지며, 문턱치 또한 공간 주파수에 따라서 달라지는데 3 cpd 근방에서 최대의 감도를 가진다. 그림 1.32(a)는 정상 시각을 가진 20세 여성의 실험 결과로써 3 cpd 근방에서 문턱치가 약 0.5%이고, 그림 (b)는 숙달된 전문가인 저자 자신의 실험 결과로써 3 cpd 근방에서 문턱치가 약 0.3% 이다.

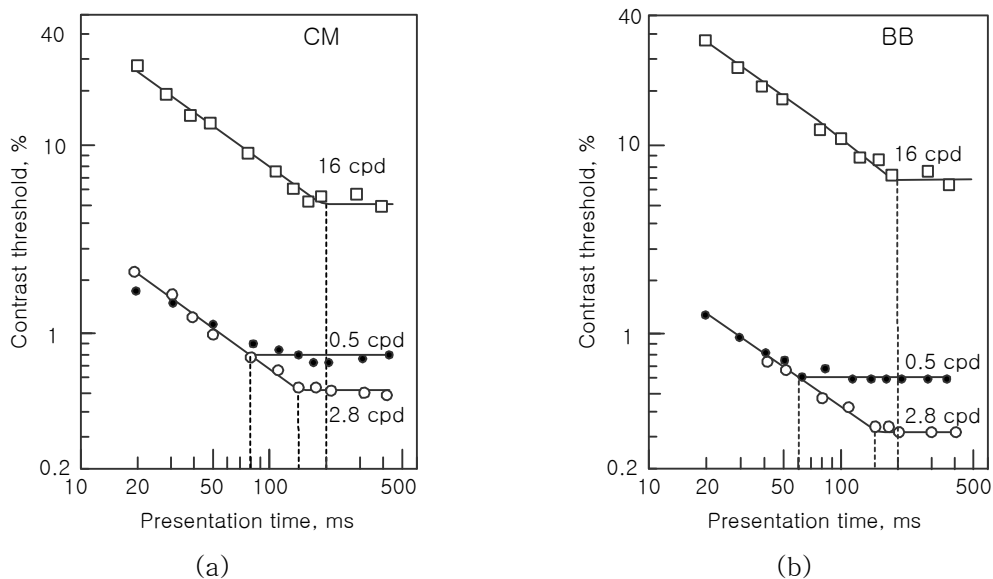


그림 1.32 제시시간과 콘트라스트 문턱치와의 관계<sup>[32]</sup>

## (3) 눈의 움직임과 공간 주파수

수평적인 공간 정현 패턴에 주시점을 유도하는 주시표를 중첩하여 여러 가지 속도로 눈을 움직이는 경우의 공간주파수 특성을 조사하면 그림 1.33과 같이 된다.<sup>[33]</sup> 이 그림에서 눈의 움직임이 빨라지면 저역 공간 주파수에서의 감도가 증가 하면서 고역 공간 주파수의 감도가 저하한다. 전체적으로 보면 정지 시에는 대역 통과 특성을 나타내나 움직임이 빠르면 저역 통과 특성을 나타낸다. 이러한 결과는 주시점 이동과 같은 비교적 큰 안구 운동 시에는 저역 주파수 영역에서 콘트라스트 감도를 증대 시키는 시각 특성이 존재함을 나타낸다.

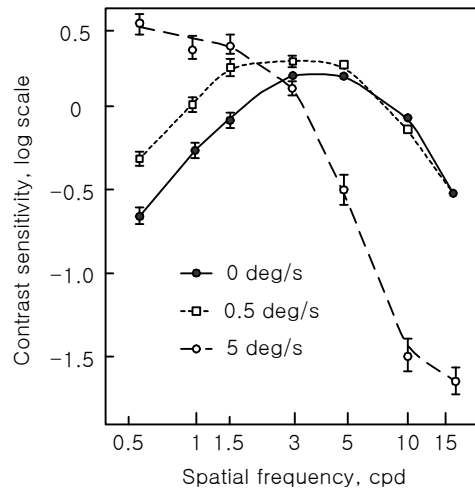


그림 1.33 주시점의 움직임과 공간 주파수특성과의 관계, 화면의 크기  $3^{\circ} \times 4^{\circ}$ .

## 1.7 주위 배경의 밝기에 따른 절대 채도

Bartleson은<sup>[34]</sup> 중심 테스트 자극을 1도 시야로 하고 주위 배경을  $30^{\circ}$  시야로 한 상태에서 주위 배경 밝기에 20분 동안 순응 시킨 후, 관찰자가 느끼는 채도의 변화량을 실험 하였다. 배경의 조명을 D65로하고 밝기를 달리 하였을 때의 실험 결과를 그림 1.34에 보였다. 이 그림으로부터 주위 배경의 밝기가 어두워 질수록 관찰자가 느끼는 채도는 낮아짐을 알 수 있다.

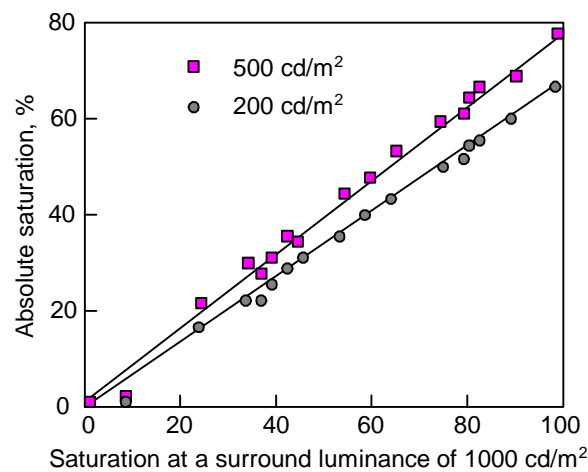
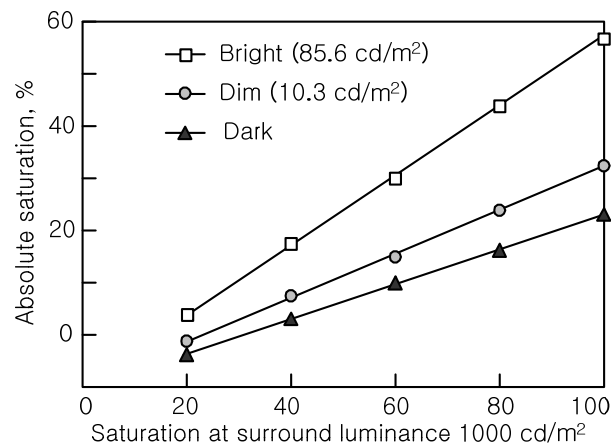


그림 1.34 주위 배경의 밝기에 따른 절대 채도

1.35 일반 가정에서의 배경 밝기에 따른 절대 채도<sup>[35]</sup>

또한, 상기 실험의 결과로부터 Bartleson은 절대 채도(absolute saturation)  $S_L$ 을 주위 배경의 밝기  $L$ 의 함수로써 다음과 같이 구하였다.

$$S_L = 0.223L^{0.217} \quad (1.5)$$

여기서 절대 채도란 주위 배경의 밝기가 1000 cd/m² 일 때 동일하게 느껴지는 채도를 나타낸다. 상기 식을 이용하여 일반적인 가정에서 TV 시청시의 조명에 의한 배경 밝기( Bright, dim, dark)에 따른 절대 채도를 계산한 결과를 그림 1.34에 보였다.<sup>[35]</sup>

## 1.8 Hunt Effect (colorfulness increases with luminance)

Hunt effect는, 1952년 Hunt가 양안의 배경이 다른 조건에서 대응 색을 찾는 도중에 발견된 현상으로써, 주어진 색 자극이 강하면 강할수록 지각되는 colorfulness가 증가한다는 것이다.<sup>[36]</sup>

그림 1.36은 Hunt의 실험 결과를 간단히 나타낸 것이다. 이 그림에서 xy 좌표계에서 색 순도가 낮은 좌표  $(x, y) = (0.35, 0.33)$ 이고 휘도가 100,000 cd/m² 인 색은, 색 순도가 높은 좌표  $(x, y) = (0.55, 0.33)$ 인 휘도 1 cd/m² 인 색과 colorfulness가 동일하다는 것이다.

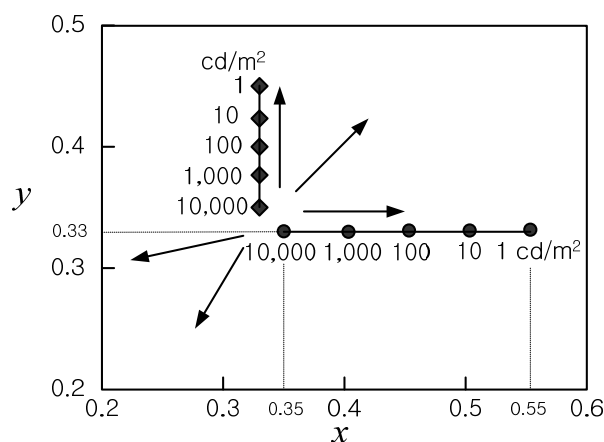


그림 1.36 A schematic representation of corresponding chromaticities across changes in luminance showing the Hunt effect. Points are labeled with luminance levels.

## 1.9 Stevens Effect (lightness contrast increases with increasing illuminance)

Stevens 효과<sup>[36]</sup>는 surround luminance가 증가하면 simple test patch에 대한 brightness contrast가 증가하는 현상이다. Stevens는 시야각 약  $58^\circ$ 의 배경에서, 그 중앙에 시야각  $5.7^\circ$ 의 테스트 패치를 만들어 양안 독립 동시 비교 평가 방법인 매그니튜드(magnitude) 비교 방법으로 실험 하였다. 그림 1.37은 Stevens의 실험 방법을 개념적으로 나타낸 것이다. 이 실험결과를 이용하여 Stevens는 배경 휘도 적응 레벨에 따른 시각의 밝기(lightness) 함수를 다음과 같이 모델링 하였다.

$$\psi = k(L - L_o)^\beta \quad (1.6)$$

여기서  $\psi$ 는 특정 관찰 조건에서 휘도 자극  $L$ 이 제시된 경우 관찰자가 느끼는 심리 물리적인 brightness로써 단위는 *bril*이다. 1 *bril*은 암 배경 상태에서 40 dB의 자극에서 눈이 느끼는 밝기의 크기이다. 0 dB는 인간이 감지 할 수 있는 최저 휘도인  $3.183 \times 10^{-7} \text{ cd/m}^2$ 이다.  $L_o$ 는 관찰자를 다양한 주위 배경 휘도에 순응시킨 후 테스트 자극을 인지 할 수 있는 문턱 값이고,  $k$  및  $\beta$ 는 관찰 조건에 따른 상수 값이다. Stevens 등은 측정 휘도 단위로 dB를 사용하였다.

표 II에는 Stevens 등이 구한 눈의 순응 레벨에 따른  $k$ ,  $\beta$ , 및 문턱치  $L_o$ 를 나타내었다. 그림 1.38에는 Stevens 등이 실험적으로 구한 표 II의 데이터와 식 (1.6)를 사용하여 배경 적응 휘도 레벨에 따른 brightness를 *bril* 단위의 그래프로 나타내었다.

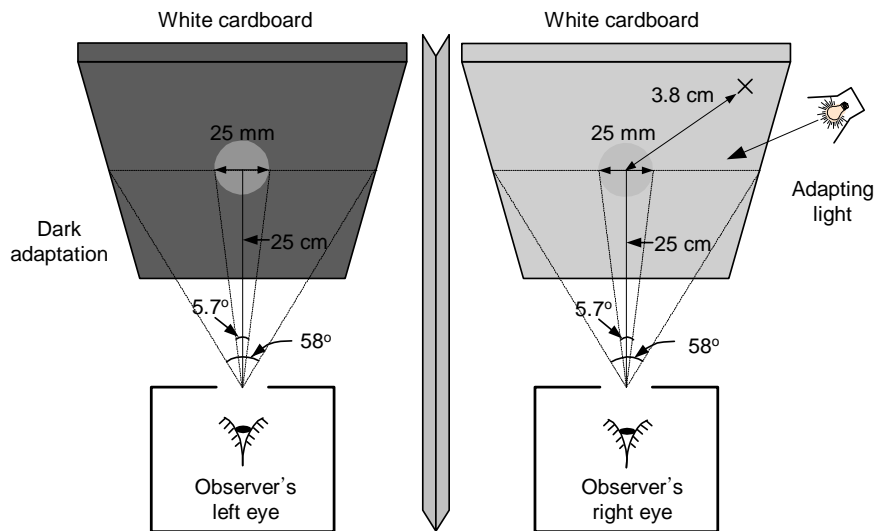


그림 1.37 Stevens의 brightness function 실험 개념도

표 II. 눈의 순응 레벨에 따른  $k$ ,  $\beta$ , 및  $L_o$ 값

Adaptation luminance		Parameter value			
$\text{cd/m}^2$	mL	$k$	$\beta$	$L_o [\text{cd/m}^2]$	mL
Dark surround		10	0.333	$2.23 \times 10^{-6}$	$7.1 \times 10^{-6}$
0.01	0.0031	9.1	0.334	0.0006	0.0002
0.1	0.0314	8.0	0.338	0.0025	0.0007
1	0.3141	6.4	0.349	0.0100	0.0031
10	3.1416	4.6	0.367	0.0400	0.0125
100	31.4169	2.9	0.392	0.2528	0.0794
1000	314.1690	1.5	0.424	0.5952	0.5011

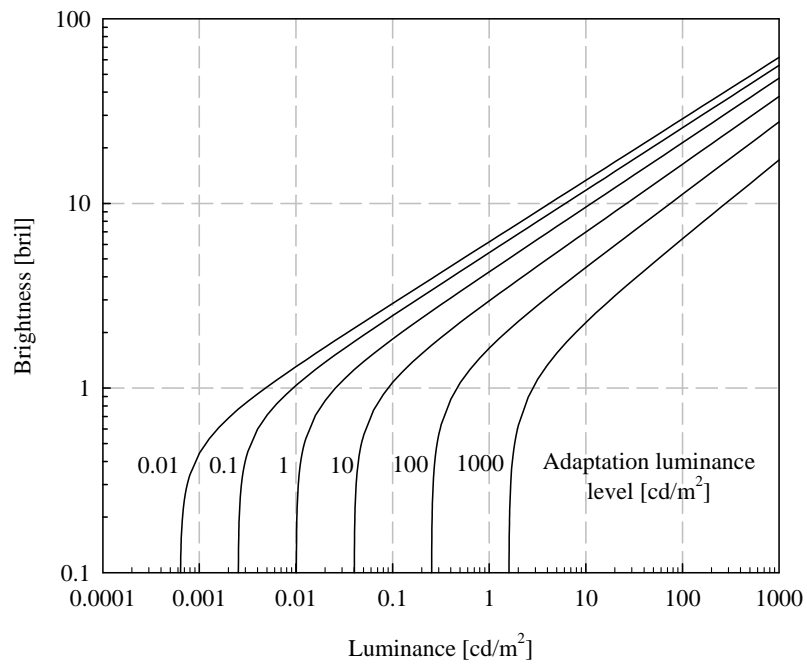


그림 1.38 Stevens의 적응 레벨에 따른 brightness function.

그림 1.39는 Stevens 효과를 상대 luminance에 따른 상대적인 brightness(lightness)를 나타낸 것이다.

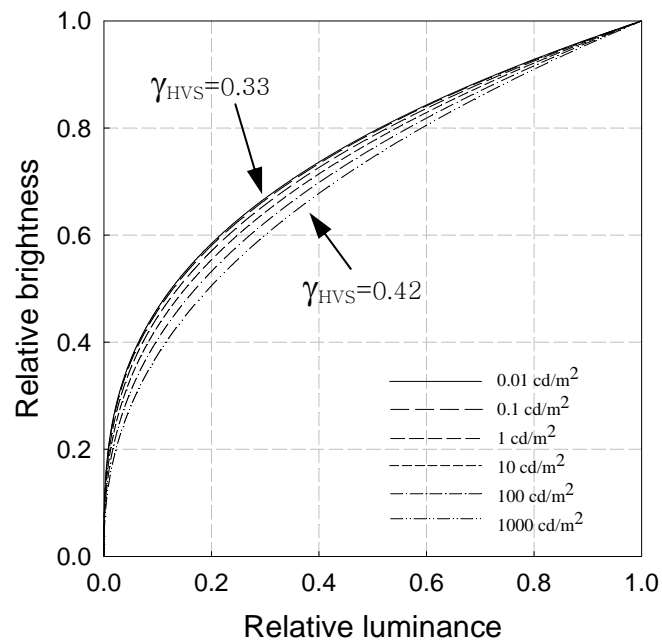


그림 1.39 Stevens effect에 의한 영상의 휘도에 따른 HVS gamma 변화



## 1.10 Bartleson-Breneman Equation (image contrast changes with image luminance)

Bartleson과 Breneman<sup>[38]</sup>은 complex image의 luminance가 증가하면 image의 brightness contrast가 증가하는 현상을 실험적으로 다음과 같이 정량화 하였다.

$$\log B = \alpha + \beta \log L - \lambda e^{\delta \log L} \quad (1.7)$$

여기서,

$B$ : Brightness estimated in *bril*.

$L$ : Luminance in *mL*.

$\alpha, \beta, \lambda, \delta$ : Parametric constants.

이다. 실험적으로 구한 파라미터는  $\alpha = 2.037$ ,  $\beta = 0.1401$ 이며, 이때의  $\lambda$  및  $\delta$ 는 휘도의 함수로써 그림 1.40에서와 같이 주어진다. 이 파라미터들과 식(1.5)를 사용하여 프린트 화상의 highlight luminance에 따른 밝기를 그래프로 그려보면 그림 1.41에서와 같다.

이 그림에서도 화상의 휘도가 밝을수록 brightness contrast가 증가 함을 알 수 있다. 또한 Stevens의 단순한 샘플에 대한 실험결과와는 달리 복잡한 화상의 경우, brightness contrast 커브의 모양이 단순한 감마 특성을 가지지 않음을 볼 수 있다.

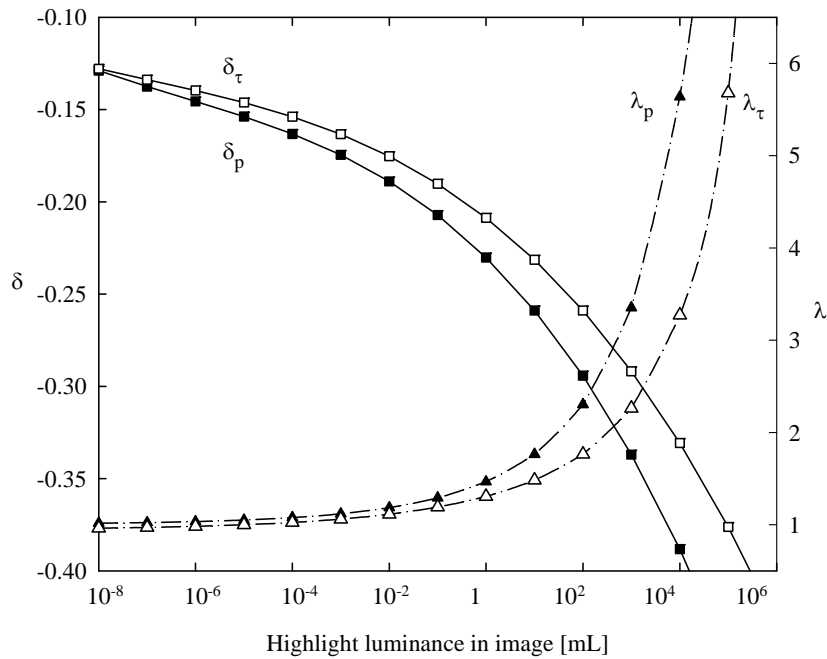


그림 1.40 High light luminance에 따른  $\lambda$  및  $\delta$ . 아래 첨자  $p$ 는 프린트(사진)에 대한 것이고  $t$ 는 transparency에 대한 값이다.

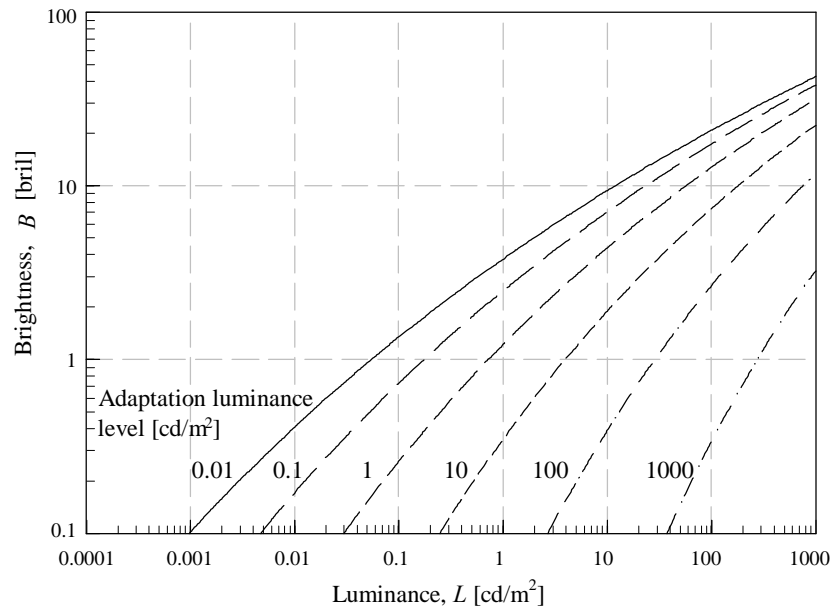


그림 1.41 프린트 화상의 luminance에 따른 brightness equation 커브

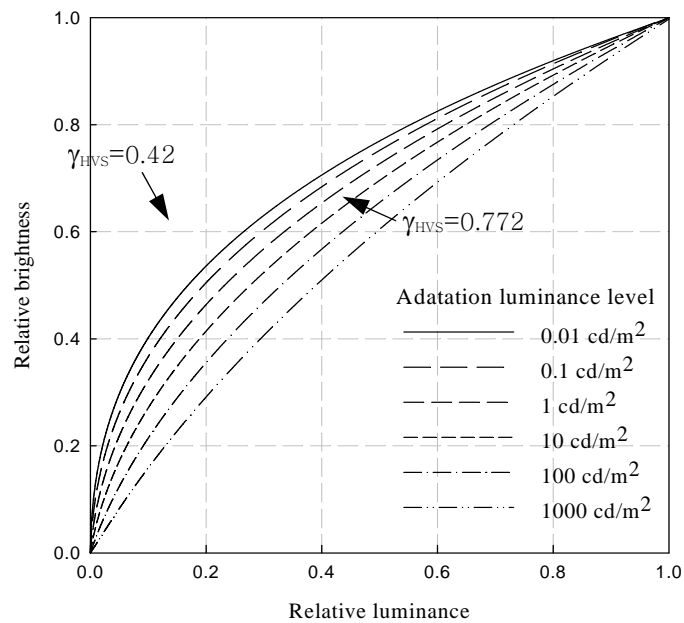


그림 1.42 Bartleson과 Breneman의 complex image에 대한 영상의 휘도 레벨에 따른 HVS gamma 변화

## 1.11 Optimum image tone reproduction

Bartleson<sup>[39]</sup>은 Bartleson-Breneman<sup>[38]</sup>의 실험 결과를 토대로 주위의 휘도가 dark, dim, light의 3가지 조건에서 시각의 lightness를 근사적으로 구하였는데, 이를 그림 1.42에 보였다. 이 그림으로부터 주위가 밝으면 디스플레이 영상의 콘트라스트가 증가하고, 반대로 어두워지면 콘트라스트가 감소하는 현상은 그림 1.39에 로그 스케일로 주어진 Stevens의 결과와 비교해 볼 때 그 경향은 거의 동일하다. Bartleson은 상기 Bartleson-Breneman equation을 근사적으로 고려할 때, 주위 조건에 따른 화상의 디스플레이 감마를 dark 시에 1.5, dim의 경우에는 1.25, 그리고 밝은 경우에는 1.0으로 할 때 최적의 tone이 재현된다는 결론을 얻었다.

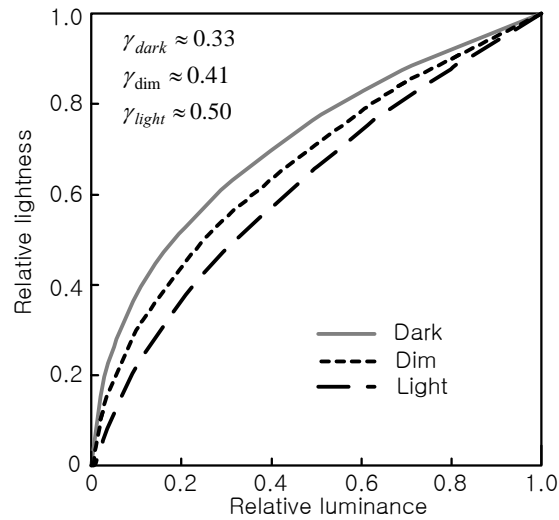


그림 1.42 주위 휘도 변화에 따른 영상의 콘트라스트 변화

### 1.12 Mach Effect

Mach effect는 그림 1.43에서와 같이 휘도가 다른 경계 부분에서, 어두운 경계 영역은 더욱 어둡게 보이고 밝은 경계 영역은 더욱 밝게 보이는 것이다.<sup>[40]</sup> 결과적으로는 시각 상에서는 물리적 윤곽보다 강조되어서 보이는 윤곽 강조 현상이다.

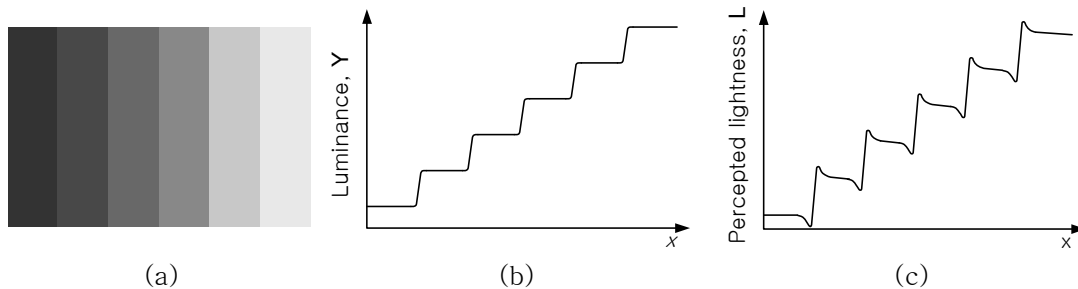


그림 1.43 Mach effect: (a) Original image; (b) 물리적 휘도 분포; (c) 시각상의 lightness 분포.

그림 1.44에서와 같이 망막상에서는 ‘On’ center 시세포 신호가 합해진 값에서 ‘Off’ surround 시세포 출력 값을 빼는 처리를 한다. 이를 신호처리 관점에서 보면 2차원 적 공간 filter 기능이다. 이 때 각 시세포 응답에 대한 weighting를 조절하면 저역 통과 특성과 대역 통과 특성을 가지게 할 수 있다. Mach effect는 이 대역 통과 필터 특성에 기인한 것이다.

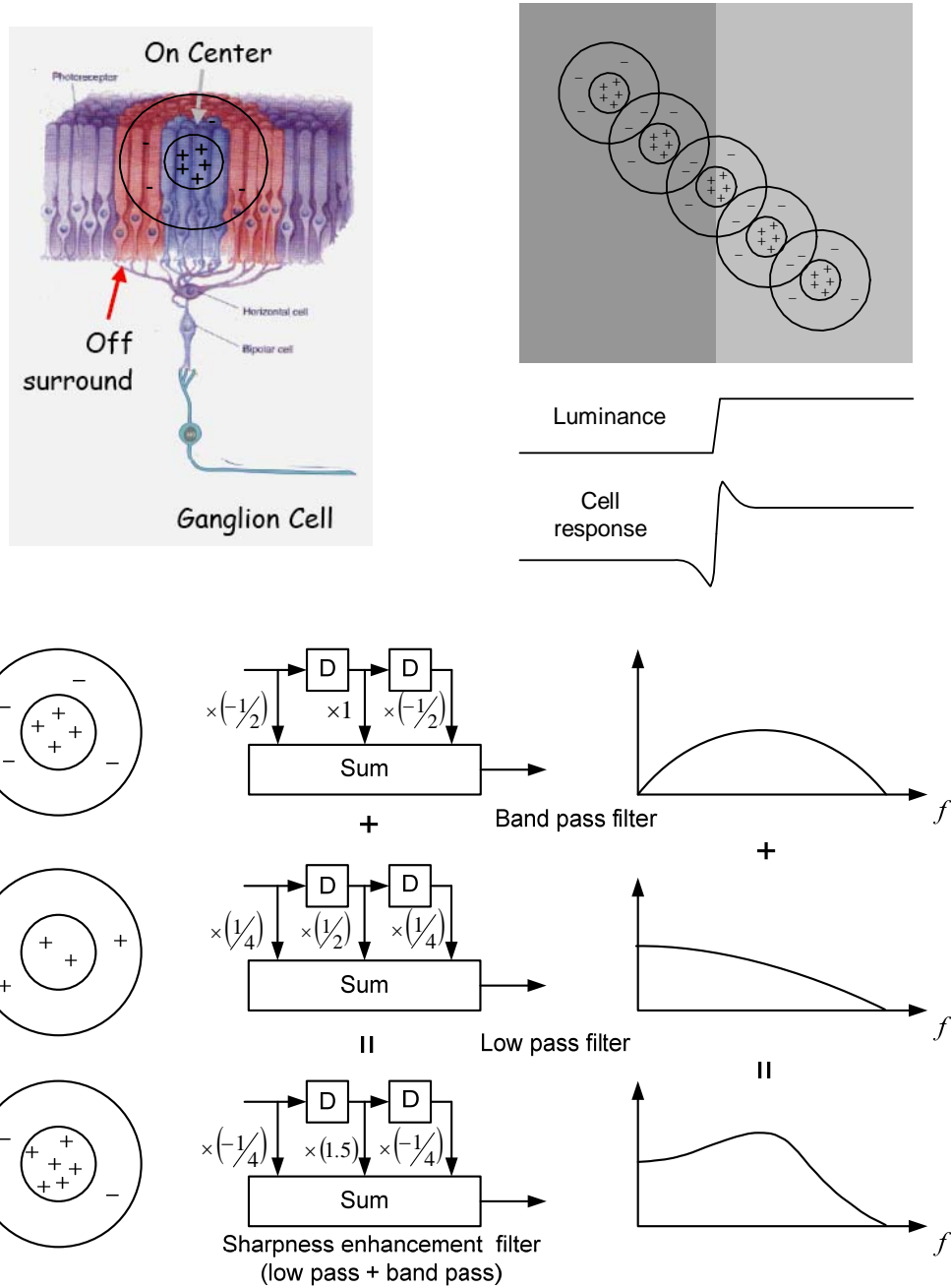


그림 1.44 망막상에서의 신호 처리.

### 1.13 Simultaneous contrast

Simultaneous contrast causes a stimulus to shift in color appearance when the color of its background changes. A light background induces a stimulus to appear darker, a dark background induces a lighter appearance, red induces green, green induces red, yellow induces blue, and blue induces yellow.

Fig. 1.45 illustrates simultaneous contrast. The two identical gray patches presented on different backgrounds appear distinct. In Fig. 1.45(a), the black background causes the gray patch to appear lighter, while the white background causes the gray patch to appear darker.

The red squares or the green squares in Fig. 1.45(b) are all surrounded by the same chromatic edges (2 yellow edges and 2 blue edges for each square). If the chromatic induction were strictly determined by the colors at the edges, then all of the red squares and all the green squares should appear similar. However, it is clear that the squares that appear to be falling on the yellow stripes are subject to induction from the yellow and thus appear darker and bluer. On the other hand, the squares falling on the blue stripes appear lighter and yellower. The simultaneous contrast for these stimuli depends more on the spatial structure than simply the local edges.

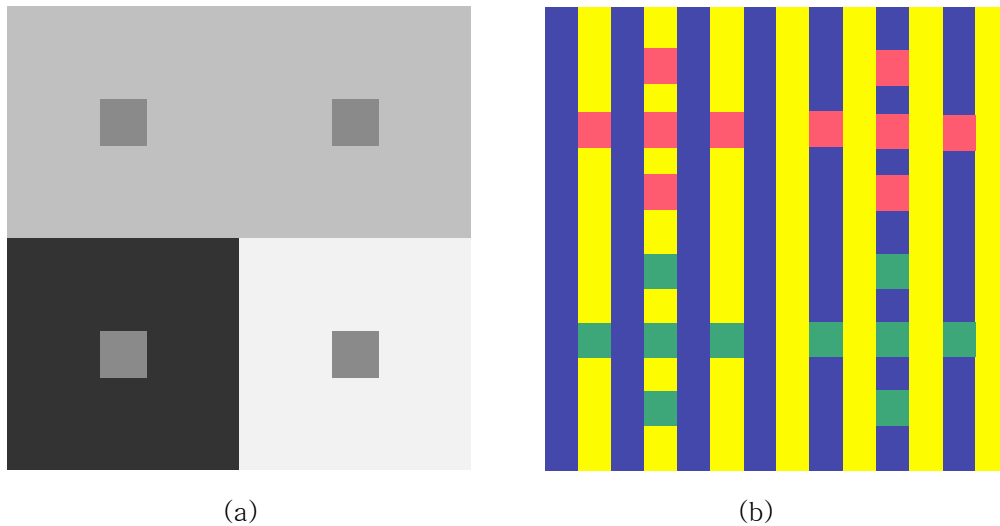


Fig. 1.45 An example of simultaneous contrast. All the grey patches in the left are physically identical, and all the red and green patches in the right are identical.

### 1.14 Crispening Effect

A special case of lightness contrast is the crispening effect, which increases the apparent contrast between two colors of similar lightness against a surround lightness of value between them. Crispening for a pair of gray patches is shown in Fig. 1.46.

In Fig. 1.46, the pair of gray patches differ slightly in value, but have the same values across all three backgrounds. However, the differences between them are most visible when they are displayed against a gray background, when the background is white or near black, these differences are obscured.

The schematic in Fig. 1.47 shows a background-adjusted lightness scale of the crispening effect. The perceived lightness contrast between grayscale steps amplified around the average lightness of the background. All the lighter values are compressed slightly toward white, and match the nominal white at the lightest step of the scale; the darker values are compressed slightly toward black. This shift is strongest within a one half Munsell value step on either side of the background value, and then becomes constant for the rest of the scale.



Fig. 1.46 An example of crispening effect. The contrast between the pairs of gray patches of slightly different lightness is greater against a background with a lightness value between them.

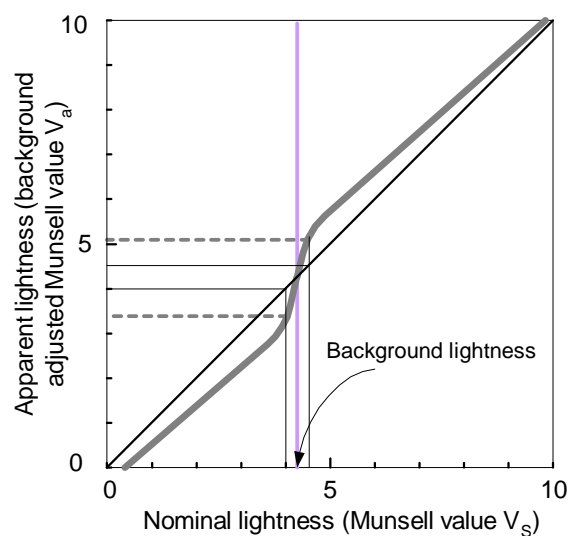


Fig. 1.47 Background adjusted lightness scale of crispening effect.

## 1.15 Spreading

Spreading is the mixture of a color stimulus with its surround. When the stimuli increase in spatial frequency, or become smaller, the simultaneous contrast effect disappears and is replaced with a spreading effect. Spreading refers to the apparent mixture of a color stimulus with its surround. This effect is complete at the spatial fusion frequency when the stimuli are no longer viewed as discrete, but fuse into a single stimulus. Spreading occurs at spatial frequencies below those at which fusion occurs.

Fig. 1.48 illustrates both simultaneous contrast and spreading along a color dimension. Colorimetrically achromatic stimuli patches of various spatial frequency are presented on a blue background. For the low frequency patches, simultaneous contrast takes place and the patches appear slightly greenish. However, at high frequencies, spreading occurs and the patches appear pinkish.

## 1.16 Helson-Judd Effect (Hue of nonselective samples)

Helson-Judd effect illustrates that nonselective (grey) stimuli viewed under highly chromatic illumination take on the hue of the light source if they are lighter than the background, and

they take on the complementary hue if they are darker than the background. It is important to note that this effect occurred only for nearly monochromatic illumination. Helson stated that the effect completely disappeared if as little as 5% white light was added to the monochromatic light.

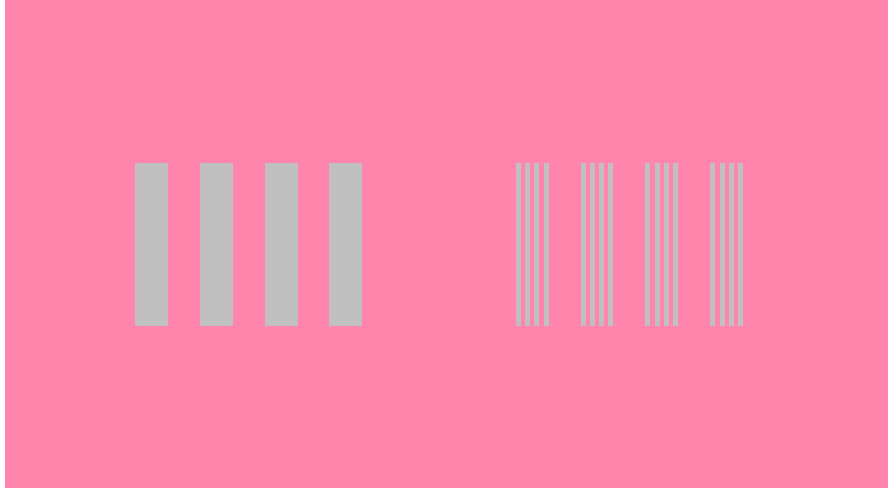


Fig.1.48 An example of the difference between simultaneous contrast and spreading. The grey patches are physically identical.

## 참 고 문 헌

- [1] 텔레비ジョン画像情報工学ハンドブック, 텔레비ジョン学会編, 제1편 제3장. 오ーム社、1990.
- [2] G. H. Hutson, P.J. Shepherd, and W.S. James Brice, *Colour Television*, 2nd edition, pp.441, McGraw-Hill, London, 1990.
- [3] Günter Wyszecki, W.S. Stiles, *Color science* 2<sup>nd</sup> Edition, pp.106, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [4] 中山、藤尾、樋渡、宮川、渡部、画穰、*画像エレクトロニクスの基礎*、텔레비ジョン学会編、pp. 79, コロナ社、東京、1975.
- [5] 텔레비ジョン画像情報工学ハンドブック, 텔레비ジョン学会編, 제1편 제3장, pp. 31, 오ーム社、1990.
- [6] S.M. Zeki, *Nature*, 274, 5670, pp.423-428, 1978.
- [7] L. Stark, *Neurological Control Systems Studies in Bioengineering*, Plenum Press, New York, 1968.
- [8] Günter Wyszecki, W.S. Stiles, *Color science* 2nd Edition, pp.257, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [9] Günter Wyszecki, W.S. Stiles, *Color science* 2nd Edition, pp.567-572, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [10] 텔레비ジョン画像情報工学ハンドブック, 텔레비ジョン学会編, 제1편 제3장, pp. 33, 오ーム社、1990.
- [11] Günter Wyszecki and W.S. Stiles, *Color Science: Concepts and methods, quantitative data and formulae*, 2nd edition, pp.645, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1982.
- [12] D. Purdy, On the saturation and chromatic thresholds of the spectral colours," *Brit. J. Psychol. (Gen. Sec.)*21. 283, 1931.
- [13] W. de W. Abney, "On the change in hue of spectrum colours by dilution with white light," *Proc. Roy. Soc. London*, A83, pp.120-127, 1910.
- [14] V.A. Kohlrausch, "Zur Photometric farbiger Lichter," *Das Lichter*, vol. 5, pp.259-275, 1935.
- [15] H. König, *Der begriff der Helligkeit*, Bibliothèque Scientifique, 10, Groffon, Neuchatel, 1947.
- [16] D.B. Judd, "A new look at the measurement of light and color," *Illum. Eng.* vol. 53 pp. 61-71, 1958.
- [17] 텔레비ジョン画像情報工学ハンドブック, 텔레비ジョン学会編, 제1편 제3장, pp. 35-47, 오ーム社、1990.
- [18] F.W. Cambell and J.G. Ronson, *J. Physiol.*, 187, pp. 551-566, 1968.
- [19] 하이비ジョン技術, NHK放送技術研究所編, pp. 21-23, 日本放送出版協会, 1988.

- [20] 渡辺, 森, 視覚の空間周波数特性, NHK技術月報, vol.8, no.11, pp. 661-668, 1965.
- [21] T. Hatada, H. Sakata, and H. Kusaka, "Psychophysical analysis of the 'Sensation of Reality' induced by a visual wide-field display," *SMPTE Journal*, vol. 89, pp. 560-569, Aug. 1980.
- [22] D. H. Kelly, "Visual response to time-dependent stimuli I. Amplitude sensitivity measurements," *J. Opt. Soc. Am.* vol.51, pp. 422-429, 1961.
- [23] H. de Lange Dzn, research into the dynamic nature of the human fovea→ cortex systems with intermittent and modulated light: I. Attenuation characteristics with white and colored light, *J. Opt. Soc. Am.* vol. 48, pp. 777-784, 1958.
- [24] W. J. Crozier, et al, *J. Gen. Physiol.*, **23**, pp. 101-141, 1941.
- [25] S. Hetch and S. Shlaer, "Intermittent stimulation by light. V. The relation between intensity and critical frequency for different parts of the spectrum," *J. Gen. Physiol.* **19**, pp.965-979, 1936.
- [26] S. H. Bartley, *Psychological Review*, vol.46, pp.344, 1936.
- [27] A. Broca, et al., *J. of Physiol.*, pp.632-640, 1902.
- [28] 坂田晴夫, 信学論 (A) J67-A, no. 4, pp. 309-315, 1984.
- [29] 小長谷正彦, 吉田博, テレビ誌, vol. 31, no. 1 pp. 36-41. 1977.
- [30] D. Methling, et al., *Vision Res.*, **8**, pp.555-565, 1968.
- [31] E. Ercoles, et al., *Atti Fond. G. Ronchi*, **23**, pp.515-525, 1968.
- [32] B. G. Breitmeyer, et al., *Vision Res.*, **17**, pp.861-865, 1968.
- [33] L. E. Arend, *Vision Res.*, **13**, pp.1035-1042, 1976.
- [34] C.J. Bartleson, "Change in color appearance with variations in chromatic adaptation," *Color Res. Appl.*, vol. 4, pp. 119-138, Fall 1979.
- [35] 최현균, 주위 밝기 변화에 따른 TV 수상기의 시스템 감마와 색농도 보정, 경북대학교 대학원 석사 학위 논문, pp. 14, 1996년 12월.
- [36] J.C. Stevens and S.S. Stevens, "Brightness function: Effects of adaptation," *Journal of the optical society of America*, vol. 53. no. 3, pp.375-385, Mar. 1963.
- [37] M. D. Fairchild, *Color appearance models*, p.146, Addison-Wesley, 1998.
- [38] C. J. Bartleson and E.J. Breneman, "Brightness perception in complex fields," *Journal of the optical society of America*, vol. 57. no. 7, pp.953-957, July 1967.
- [39] C. J. Bartleson, "Optimum image tone reproduction," *J. SMPTE* **84**, pp. 613-618, 1975.
- [40] 宮川,渡部, 画像エレクトロニクスの基礎, pp. 98, コロナ社, 1975年.
- [41] Brian A. Wandell, *Foundations of Vision*, Sinauer associates, Inc. Sunderland, Massachusetts, 1995.
- [42] D. R. Williams, N. Sekiguchi, W. Haake, D. Brainard, and O. Packer, "The cost of trichromacy for spatial vision," in *From Pigments to Perception*, A. Valberg and B.B. Lee, Eds., Plenum Press, New York, N.Y., pp11-12, 1991.
- [43] M. D. Fairchild, *Color appearance models*, pp.146, Addison-Wesley, 2005.
- [44] <http://histonano.com/books/Junqueira's%20Basic%20Histology%20PDF%20WHOLE%20BOOK/23.%20The%20Eye%20and%20Ear-%20Special%20Sense%20Organs.htm>
- [45] Michele Rucci1, Ramon Iovin1, Martina Poletti1 & Fabrizio Santini1, "Miniature eye movements enhance fine spatial detail," *Nature* vol. **447**, pp. 852-855, doi:10.1038/nature05866; June 2007.