

## Luminance 에 의한 Pupil 의 변화에 대한 모델

김 용 근

동신전문대학 안경광학과  
광주시 북구 두암동 771, 500-714  
(1996년 12월 받음)

동공반사에 의한 동공크기 변화는 luminance 량에 의해 결정되며, 동공크기에 따른 외부 광량의 투과량인 망막조도비 분포함수와, luminance 량에 따른 추체, 간체의 수용체 분포함수에 의존한다. Luminance 에 대한 동공크기 변화는 다음과 같은 수식적 모델로 표현 할 수 있다.

$$y(x) = \alpha + \beta \frac{1}{1 + \exp(x - x_0) / \theta}$$

여기서  $\alpha$ 는 luminance 의 최대값에서 동공직경 크기이고,  $\beta$ 는 동공직경 최대,최소 편차,  $\theta$ 는 개인차의 민감도를 나타내는 parameter 이다. P.Moon등의 실험값과 비교해 보면 이모델식이 잘 일치함을 알 수 있다.

### A Model of Pupil's Change with Luminance

Yong-Geun Kim

Dept. of Ophthalmic Optics

Dongshin College, Kwangju, 500-714, KOREA

(Received December 1996)

The size of pupil with pupillary light reflex is determined by the amount of a luminance, and it is dependent with the distribution function of the retinal illuminance which is the amount of transmittance for the external light due to the size of pupil, and the detector of cone and rod due to the amount of the luminance. The change of the pupil size with the luminance can be expressed with the mathematical model

$$y(x) = \alpha + \beta \frac{1}{1 + \exp(x - x_0) / \theta}$$

where  $\alpha$  is the size of the pupil diameter in a maximum value of the luminance,  $\beta$  is the deviation of the pupil's diameter between maximum and minimum,  $\theta$  is the parameter showed the degree of a sensitivity. Comparing with the experimental value of P.Moon et al, We known that the equation of the model is very compatible.

## I. 서 . 론

동공(pupil)의 크기 변화 원인중 하나는, 눈의 외부 광량에 따라 망막으로 들어온 광량을 조절할 목적으로 동공이 축소 하거나, 확대하게 된다. 교감신경과 부교감신경의 생리적 변화에 의한 변동 hippus를 제외하고는 광량이 적을 때는 동공 산대근(dilator pupillae muscle)에 의해 동공은 커지고, 과도 광량이 들어갈 경우 동공 괄약근(Sphinctor pupillae muscle)에 의해 동공이 축소된다. 이와같이 miosis와 mydriasis은 광선에 대한 시신경 반사가전에 의하여 동공 산대근과 동공 괄약근을 자극하게 되는 동공반사(Pupillary light reflex)가 형성된다. 이런 대광반사 경로[1,2]는 광선이 optic cell, bipolar cell, ganglion cell등의 자극경로를 통과후 optic chiasm에서 교차한다. 이때 temporal retina에서 오는 시신경 자극은 교차하지 않고 같은 방향의 optic tract으로 가지만 양단의 nasal retina에서 오는 시신경 자극은 교차해서 반대편 시력으로 간다. 이런 경로를 통해 lateral geniculate body에 이르기 전에 pretectal 영역의 pretectal nucleus으로 자극되어 결국 중뇌에 자극하게 된다. 결국 부교감신경의 흥분이 나와 superior orbital fissure을 통하여 안와로 돌아오고 하사근으로 이어진 모양신경절로 들어간다. 여기서 short posterior ciliary nerver을 따라 안구내로 들어가, 결국 모양체근과 동공괄약근을 자극하게 된다. 이런과정을 통하여 광 luminance에 의해 동공크기를 조절하게 된다. 이런 실험적 연구는 P.Moon[3] 이후많은 사람들에 의해 실험적으로 측정되어 왔다.

본 연구는 동공크기에 따른 luminance의 최종투과량인 망막조도 대비의 분포함수와 luminance 량에 따른 추체와 간체의 수용체의 분포함수를 분석 하여, 광 luminance와 동공크기의 상관관계의 mechanism 으로 부터 수식적 모델을 만들었다.

## II. 모델전개 와 결과및 고찰

동공반사의 주된 원인은 광반응, 원근 근거리 반응, tourmary 반응, 시감각 반응, 정신지각성 반응, 개검 반응 등이 있다. Luminance에 대한 동공 반사만 고려한 경우 주 원인은 광반응이다. 이런 광반응의 자극에 대한 반응은 홍채 근육 활동 정도로 나타낼 수 있다.

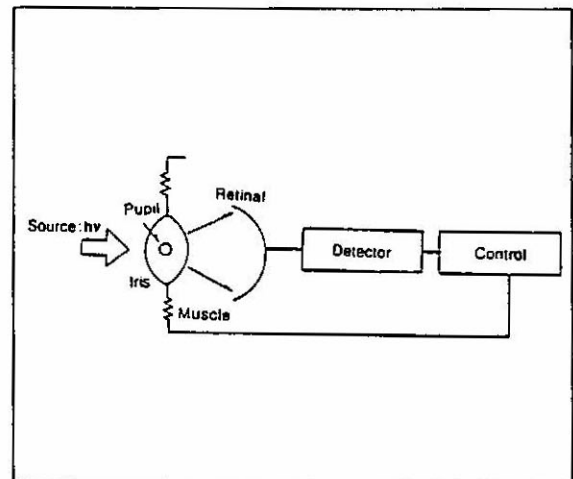


Fig. 1 자극광에 대한 동공크기 조절 mechanism

자극과 반응의 신경 분포를 단순하게 luminance와 홍채에 대한 동공크기 반응으로 간단히 도식화 하면 다음의 Fig. 1 와 같다. 광원의 일정량 Luminance가 입사하게 되면 조리개(홍채)를 투과 하는 투과면적에 따라 상(망막)에 광량이 가해지게 되고 이량은 detector에서 량이 계산되고, 이량에따라 다시 control 홍채에 의해 동공크기를 조절하여에서 조리개(홍채)의 입사광량을 제한하게 된다.

이런 mechanism를 조절하는 parameter는 홍채를 통과하는 투과광량과 망막에서 detector인 추체와 간체 분포함수 등이 관여하게 된다. 먼저 동공중심으로부터 반경에 따른 망막에 이르는 광투과를 비는 중심에서 가장크고, 가장자

리로 갈수록 작아진다. 이러한 실험적 결과는 명소시에서 측정된 Stiles-Crawford[4,5]의 data로부터 동공위치(r)에 따른 투과율비(T)를 수직으로 나타내면 다음과 같다

$$T = 1 - 0.085r^2 + 0.002r^4 \quad (1)$$

이 식은 원점에 최대값 1를 갖고 r이 커질수록 작아짐을 의미한다. 실제 망막에 들어오는 광량은 동공면적에 관계되므로 동공 크기에 따른 단위면적당 광투과 효율을 고려하면

$$T = \frac{1}{\pi r^2} \left[ \int_0^r T(r) dr \right] \quad (2)$$

로 주어진다. 그러므로 위치 r에 따른 T'값을 구하여 그래프로 그린결과 Fig.2 와 같다.

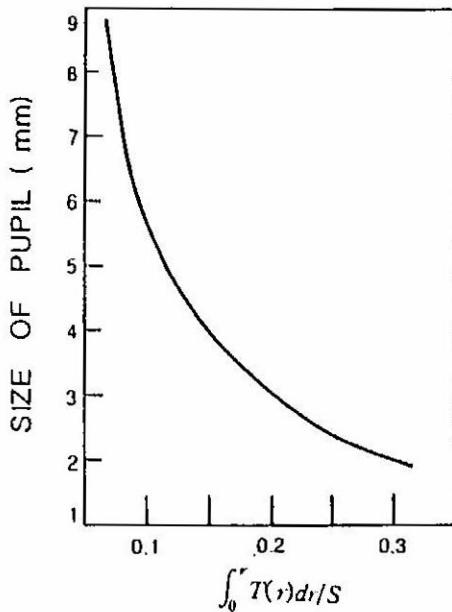


Fig.2 동공크기의 면적당 광투과율비와 동공크기 관계

동공직경 4.9mm를 중심으로 직경이 더 클 경우 기울기 값 (T'/mm) 은 0.1~0.2 정도이고 4.9mm보다 작을 경우 기울기 값은 0.45~1.25로 주어진다. Fig.2에서 주어진 정보는 단위면

적당 투과효율이(T') 작아지면 동공직경은 커지고 반대로 T'값이 커지면 동공직경은 작아지게 됨을 볼 수 있다. 그러나 detector 라고 할 수 있는 간체와 추체가 투과효율과 비례관계에 있지 않다. 왜냐하면 추체와간체가 반응하는 것은 투과한 광량의 정도에 따라 반응 영역이 분리되어 있고, 특히 특정 광량에서 반응이 많이 일어나는 등, 투과광량에 따라 선형적인 비례관계가 아님을 알 수 있다. 그러므로 망막조도에 대한 일정비율로 작용하지 않으므로 Fig. 2 그래프 형태의 비율로 홍체에 적용되지 않을 것이다. 이것은 결국 망막조도에 따른 detector (간체,추체) 반응갯수에 관련됨을 알 수 있을 것이다.

Fig. 3 는 Hecht[6]가 구한 망막 illumination 과 추체, 간체 상대적 반응수를 나타내고 있다. Fig 3에서 단위 면적당 투과효율이 낮은 영역에서 들어간 광은 이를 받아들이는 영역인 log L=0 이하의 곳에서 detector반응수는 상대적으로 낮아지게 된다. 반대로 단위면적당 투과효율이 높은 광을 받아들이는 logL=0보다 큰 영역에서는 추체가 상대적으로 많이 반응하게 된다. 그리고 luminance인 logL 값이 -1~2가 detector 반응수가 가장 많이 분포하므로 이 영역에서 luminance에 대한 추체만이 가장 예민하게 될 것이다.

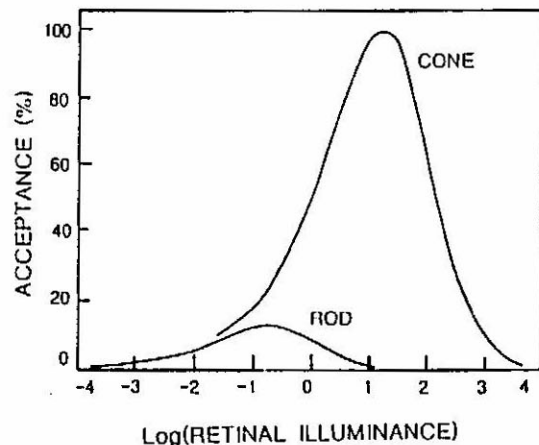


Fig.3 망막조도 대비와 추체와 간체에 의한 수용체 비율

결국 위 여러논의로 부터 다음과 같은 luminance에 따른 동공직경 변화를 모델화 시킬 수 있다.

1. Luminance L값의 대수인 logL 값이 -1~-2사이의 변화율(-∂y/∂L)이 커야 한다.
2. logL이 1 인 값에서 자연상태의 동공크기를 결정 해야한다.
3. 사람의 개인차에 대한 parameter 값이 있어야 한다.
4. 자연상태 luminance에서 보다 큰 luminance에서도 동공 크기가 작아져야 하고, 낮은 luminance에서는 커져야 한다.
5. 동공크기의 최대, 최소값이 존재해야 한다.

먼저 luminance값 L에 대한 log값을 x값으로 잡고, 자연상태 luminance L<sub>0</sub>인 logL<sub>0</sub>=x<sub>0</sub>를 중심으로 동공크기 변화 y(x)에  $-\frac{\partial y}{\partial x}$ 에서 가장 큰 변화량을 갖게 되어야 한다. 그러므로 동공크기 상대적인 값을 최대값은 1로 최소값은 0으로 할 경우 다음과 같이 고려할 수 있다.

$$(0 \sim 1) = \frac{1}{1 + \exp(x - x_0)} \quad (3)$$

여기서 (0~1) 값의 의미는 최대 동공크기 y<sub>max</sub>, 최소 동공크기를 y<sub>min</sub> 이라하면 (0~1)값은 (y-y<sub>min</sub>)/(y<sub>max</sub>-y<sub>min</sub>) 으로 대응된다. 그런데 위식은 오직 단일 값만 적용되다. 그러므로 개인차의 parameter를 포함한 식으로 완성하면

$$y(x) = \alpha + \beta \frac{1}{1 + \exp(x - x_0) / \theta} \quad (4)$$

가 된다. 여기서 α 값을 luminance의 최대값에서 동공직경 크기이고, β는 동공직경의 최대, 최소 차이 변화량이고, θ는 개인차에 따른 상수이다.

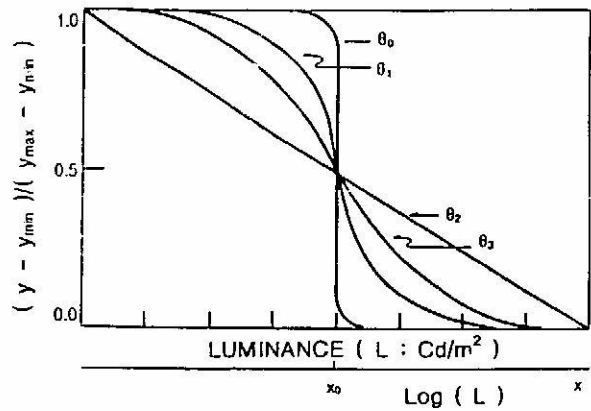


Fig.4 Parameter 값에 따른 동공직경 변화 곡선

Fig.4 는 상수 θ에 따른 luminance에 대한 동공 직경크기를 나타내고 있다.

그림에서 luminance에 대한 parameter θ 값에 따라 (θ<sub>0</sub> < θ<sub>1</sub> < θ<sub>2</sub> < θ<sub>3</sub>) 동공 직경 관계를 나타내고 있다. θ 값이 작아지면 x<sub>0</sub> 근처에서 민감도가 커지고 θ 값이 커지면 x<sub>0</sub>에 관계없이 x(logL)값에 대한 동공크기가 완만한 선형값으로 변화 됨을 볼 수 있다. Luminance에 대해 민감도는 결국 θ 값에 의존함을 볼 수 있다.

P.Moon[2]이 구한 실험값과 본 연구의 이론적 모델값의 타당성을 검토하면 Fig. 5 와 같다. 실험식과 이론적 모델로 구한 수식이 잘 일치함을 알 수 있다. 이때 구한 각 parameter 값은 α = 1.96, β = 5.96, θ = 1.27으로 얻을 수 있다.

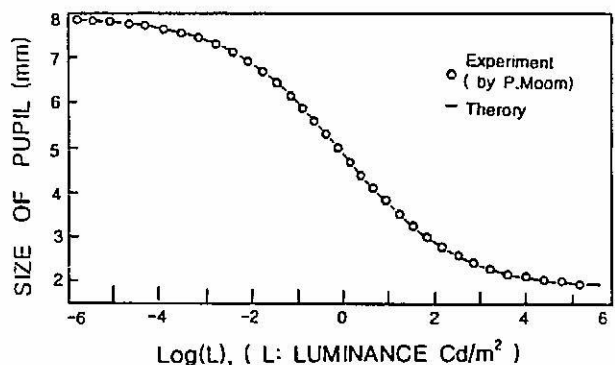


Fig.5 Luminance에 대한 동공크기 변화의 이론 값과 실험값의 비교

### 참고문헌

- [1] Gunter K. Von Noorden, Binocular Vision and Ocular motility, The C.V.Mosby company. (ST Louis), p115 (1985).
- [2] W.M.Hart, Physiology of the Eye, Mosby Year book, St.Louis p.421 (1992).
- [3] P.Moon, D.E.Spencer, J. Opti. Soc.Am., 34, 319 (1944).
- [4] W.S.Stiles; Proc. Roy. Soc. Lond. 127B, 64 (1939).
- [5] B.H.Crawford; Proc.Phys. Soc. Lond. 62B,321 (1949).
- [6] Hecht.S, J. Gen. Physiol. 11, 255 (1928).