

다색 광원에 대한 가우시안 진폭을 갖는 광학계의 결상 특성*

박성종 · 박혜정

순천청암대학 안경광학과, 순천 540-743

(1999년 11월 6일 받음)

다색 광원에 대한 가우시안 진폭을 갖는 광학계의 결상 특성을 조사하기 위하여 다색 광원에 대한 결상 광학계의 색도(chromaticity) 변화와 조도(illuminance) 분포를 계산하였다. 본 논문에서 고려된 다색 광원은 색온도가 2,856K인 텅스텐 백열 램프(incandescent-tungsten lamp)를 나타내는 A광원, 대낮의 평균 햇빛(daylight)을 나타내는 C광원, 대낮의 평균 햇빛의 파장영역을 자외선 영역까지 확대하여 보강한 D_{∞} 광원이다.

다색 광원들의 종류에 따라 기하학적 상점에서의 색도 값이 다르게 나타났으며, 기존의 균일한 진폭을 갖는 광학계에 비해 색도 변화가 매우 작게 나타났다. 조도 분포는 다색 광원의 종류에 따라 거의 변화가 없었으며, 초점 심도는 기존의 균일한 진폭을 갖는 광학계에 비해 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 결상 광학계에 입사하는 광의 진폭 형태를 균일한 진폭에서 가우시안 형태로 변조시켜줌으로써 초점 심도는 크게, 색도 변화는 작게 할 수 있

The Image-forming Property of Optical System having Gaussian Amplitude for Polychromatic Source*

Seong Jong Park and Hae Jong Park

Department of Ophthalmic Optics, Suncheon Chongam College, Suncheon 540-743

(Received by 6 November 1999)

To investigate the image-forming property of optical system having Gaussian amplitude for polychromatic source, we calculated the chromaticity variation and the illuminance distribution. Considered polychromatic sources in this paper are A light which is an incandescent-tungsten lamp, C light which is a daylight, and D_{∞} light which is a extend daylight to the near ultraviolet.

The polychromatic sources represent the different chromaticity values at a geometrical image point. The chromaticity variation of optical system having a Gaussian amplitude is smaller than that having an uniform amplitude. The illuminance distributions for polychromatic sources present nearly the same values, and the depth of focus for optical system having a Gaussian amplitude is wider than that having an uniform amplitude.

From these results, we know that the depth of focus increases and the chromaticity variation decreases, when the incident light amplitude is modulated from an uniform amplitude to a Gaussian amplitude.

*본 논문은 1999년도 순천청암대학 학술진흥연구비 지원으로 수행되었음.

I. 서 론

최근 광산업의 급속한 발달로 결상 광학계의 사용 범위가 넓어지고 다양화 되어감에 따라 연구활동을 위해 사용되는 결상 광학계 뿐만 아니라, 안경, 현미경, 망원경 등 일상 생활에서 사용되는 결상 광학계에서도 보다 우수한 결상 능력을 갖는 결상 광학계가 요구되고 있으며, 이러한 우수한 결상 능력을 갖는 결상 광학계를 사용 목적에 맞게 설계 및 제작하려는 연구가 산업체를 비롯한 각 연구소에서 활발하게 진행되고 있다.

이러한 결상 광학계에 대한 기존의 연구는 실제 관측되는 색감각에 대한 반응체의 고려가 없이 상질을 저하시키는 단색 수차(monochromatic aberration)와 단색 광원에 대한 회절 효과만을 고려한 광학계의 결상 특성에 관한 연구가 주로 수행되어 왔다^{1,2}. 그러나 실제 안경렌즈를 비롯한 수많은 결상 광학계는 가시광선과 같은 다색 광원(polychromatic source)에서 사용되도록 설계되고 있으며, 이러한 결상 광학계에 의해서 맺혀지는 상도 색감각을 갖는 반응체(color sensitive receiver) 즉 사람의 눈, 필름, 형광물질 등에서 결상된다. 이러한 색이란 어떤 종류의 빛에 의하여 우리 눈이 느끼는 감각으로 비록 크기와 형태가 같은 물체라도 결상 광학계의 종류와 형태에 따라 우리 눈을 비롯한 반응체가 느끼는 색감은 다르게 되기 때문에 다색 광원에 대한 결상 광학계의 결상 특성에 대한 연구는 대단히 중요하며, 필수적이다.

본 연구에서는 일반 광학계뿐만 아니라 눈에 들어오는 입사광의 형태가 가우시안 형태의 진폭을 많이 갖기 때문에 가우시안 진폭을 갖는 광학계의 상면과 축상의 조도와 색도 변화를 조사하였다.

II. 이 론

1. CIE 색도도와 조도

결상 광학계의 성능 평가에 대한 계산을 용이하게 하는 Hopkins canonical 좌표계를³ 사용하여 임의의 파장이 눈을 비롯한 결상 광학계에 입사한 경

우에 망막과 같은 상면에서의 강도 분포를 표현하면

$$G_{\lambda}(p', \psi') = \frac{1}{\lambda^2} \left| \frac{1}{A} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \phi) \times \exp[2\pi i p' r \cos(\phi - \psi')] r dr d\phi \right|^2 \quad (1)$$

이며, 초점이동에 따른 광축상의 강도 분포는 다음과 같이 표현된다.

$$G_{\lambda}(W_{20}) = \frac{1}{\lambda^2} \left| \frac{1}{A} \int_0^{2\pi} \int_0^1 T(r, \phi) \times \exp[2\pi i W(r, \phi)] r dr d\phi \right|^2 \quad (2)$$

여기서 (r, ϕ) 와 (p', ψ') 는 각각 입사동과 상면에서 환산 극좌표, W_{20} 은 초점 이동량, λ 은 입사광의 파장, 그리고 A 는 무수차 광학계의 초평면상($p' = \psi' = 0$)에서의 강도 분포를 나타낸다. 또한 $f(r, \phi)$ 는 동함수로

$$f(r, \phi) = T(r, \phi) \exp[2\pi i W(r, \phi)] \quad (3)$$

으로 표현되며, $T(r, \phi)$ 는 실수진폭, $W(r, \phi)$ 는 파면수차를 나타낸다.

표색계(color specification system)가 유용하려면 관측자의 심리적인 요인이 고려되어야 하기 때문에 국제조명위원회(CIE)에서는 많은 관측자들의 반응을 평균하여 표준 관측자를 정의하였으며, CIE는 이 표준 관측자와 가상의 삼원색을 결합하여 CIE 삼자극체계를 만들었다.

임의의 다색 광원에 대한 표준 관측자가 느끼는 색을 표현하는 삼자극치(tristimulus value)는

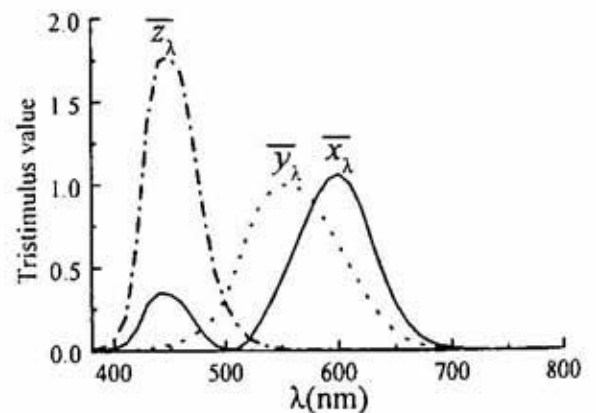


그림 1. 표준 관측자에 의해서 측정된 색감각 함수.

$$X = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) G_{\lambda}(p', \psi') \bar{x}_{\lambda} d\lambda \quad (4)$$

$$Y = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) G_{\lambda}(p', \psi') \bar{y}_{\lambda} d\lambda \quad (5)$$

$$Z = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) G_{\lambda}(p', \psi') \bar{z}_{\lambda} d\lambda \quad (6)$$

으로 표현된다. 여기서 $S(\lambda)$ 는 임의의 다색 광원의 스펙트럼 분포, G_{λ} 는 상면에서 임의의 파장에 대한 강도 분포 $\bar{x}_{\lambda}, \bar{y}_{\lambda}, \bar{z}_{\lambda}$ 는 눈의 색감각 함수(color sensitivity function), 그리고 λ_1 와 λ_2 는 반응체가 느낄 수 있는 파장 영역을 나타낸다. 그림 1은 표준 관측자에 의해서 측정된 색감각 함수를 나타내고 있다.

식 (5)에서 정의된 y 는 다색 광원에 대한 조도(illuminance)를 나타내며, 색도 좌표는 식 (4)~(6)의 삼자극치로부터 다음과 같이 정의된다.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (7)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (8)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (9)$$

여기서 $x+y+z=1$ 이므로 세 변수 중 하나의 변수는 다른 두 개의 변수에 의해 결정되기 때문에 색도 좌표를 표현할 때는 두 개의 변수만을 고려하면 된다. 이 때 x 를 수평축으로, y 를 수직축으로

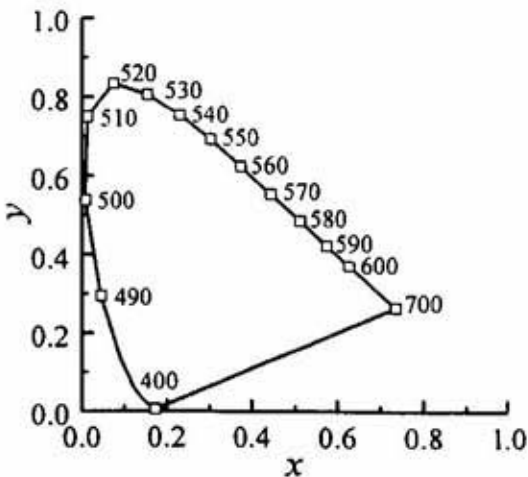


그림 2. CIE 색도도.

한 CIE 색도도가 일반적으로 사용되며, 스펙트럼의 좌표를 연결하면 그림 2와 같이 말굽모양이 된다.

2. 다색 광원과 동함수

본 논문에서 고려한 다색 광원으로 색온도가 2,856K인 텅스텐 백열 램프(incandescent-tungsten lamp)를 나타내는 A 광원, 대낮의 평균 햇빛(daylight)을 나타내는 C 광원, 대낮의 평균 햇빛의 파장영역을 자외선 영역까지 확대하여 보강한 D_{65} 광원을 고려하였으며, 이 다색 광원들의 파장에 따른 분광 분포는 그림 3과 같다.

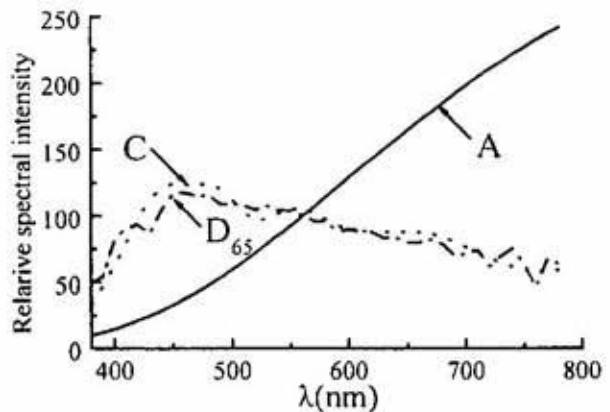


그림 3. 파장에 따른 분광 분포.

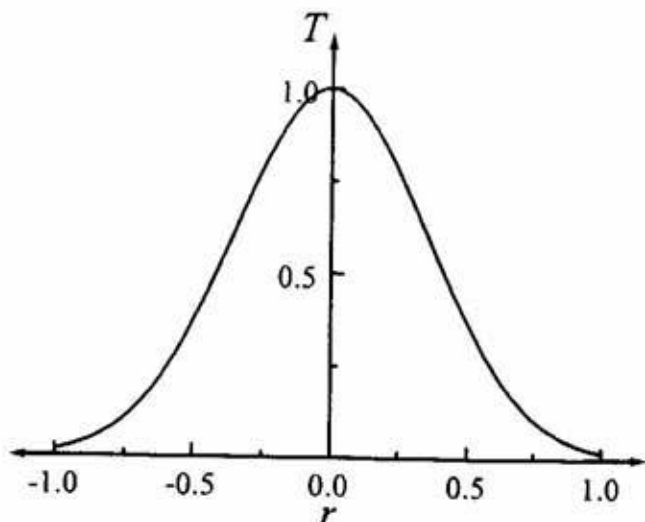


그림 4. 가우시안 진폭을 갖는 광학계의 실수 진폭.

또한 본 논문에서는 일반 광학계뿐만 아니라 눈에 들어오는 입사광의 형태가 가우시안 형태의 진폭을 많이 갖기 때문에 가우시안 진폭을 갖는 광학계의 동함수를 고려하였으며, 이 때 입사광의 실수 진폭은

$$T(r, \phi) = \exp\left[-\frac{r^2}{0.5^2}\right] \quad (10)$$

으로 표현된다. 이 때 입사광의 실수 진폭의 형태는 그림 4와 같으며, 본 논문에서는 입사동의 크기를 1인 원으로 환산하여 표현하였다.

III. 수치결과¹⁰⁾

그림 5는 다색 광원에 대한 상면의 반경 변화에 따른 색도 변화를 나타내고 있다. 여기서 (a)는 A광원, (b) C광원, (c) D₆₅광원을 나타내고 있다. 각 다색 광원에 대한 색도 변화는 다색 광원에 따라 기하학적 상점을 중심으로 상면 반경이 증가함에 따라 장파장 쪽으로 이동하고 있으며, 다색 광원의 종류에 따라 기하학적 상점에서의 색도 값이 각각 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히 A광원의 경우에는 장파장쪽에서 시작하여 점점 약 600nm의 단색광쪽으로 색도가 변화하고 있음을 알 수 있으며, 상면의 반경 변화에 따른 색도 변화는 C광원과 D₆₅광원의 색도 변화보다 작음을 알 수 있다. 또한 C광원과 D₆₅광원은 상면의 반경 변화에 따른 색도 변화가 거의 비슷하게 나타나고 있다.

가우시안 진폭을 갖는 광학계의 상면 반경에 따른 색도 변화는 기존에 발표된 균일한 진폭을 갖는 광학계의 상면 반경 변화에 따른 색도 변화에 비하여 매우 작게 나타났으며, 이러한 결과는 눈에 입사되는 입사광의 진폭을 가우시안 형태가 되게 함으로써 색도 변화를 작게 할 수 있음을 알 수 있다.

그림 6은 다색 광원에 대한 축상 이동에 따른 색도 변화를 나타내고 있다. 여기서 (a)는 A광원, (b) C광원, (c) D₆₅광원을 나타내고 있다. 그림 6에서 다색 광원에 대한 축상 이동에 따른 색도의 변화를 관찰하여 보면 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이러한 결과는 약한 근시나 원시의 경우에는 정시의 경우와 거의 색도 변화가 없음을 알 수 있다. 또한

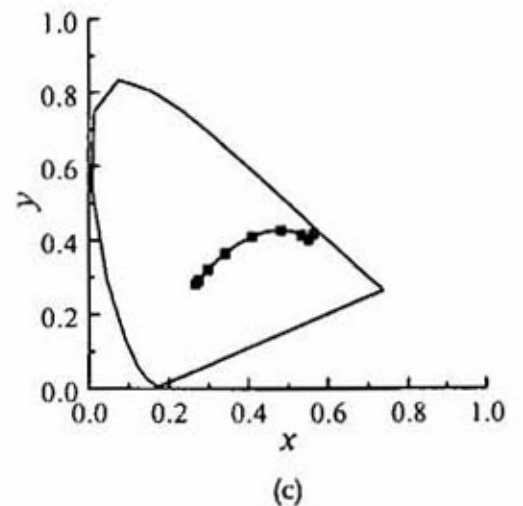
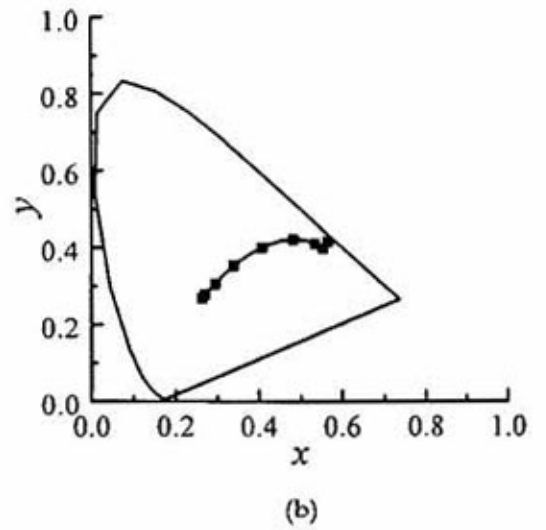
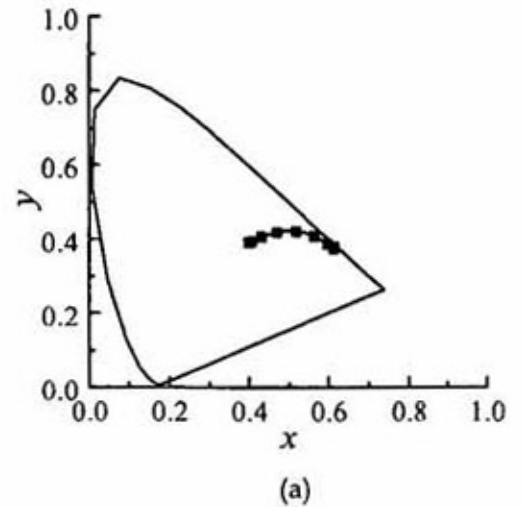
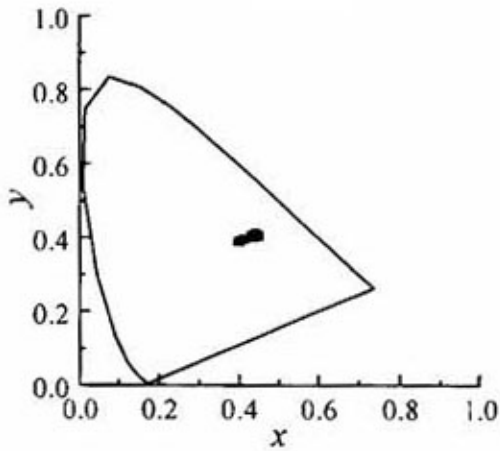
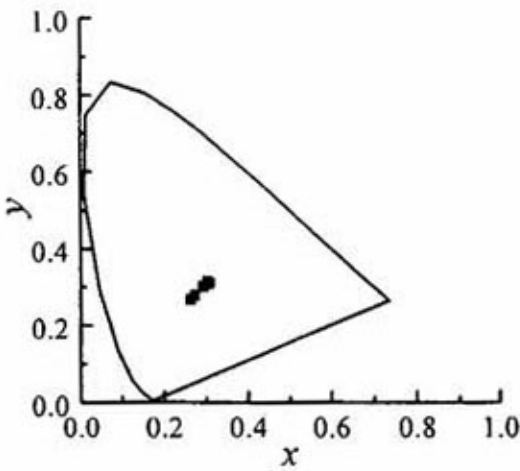


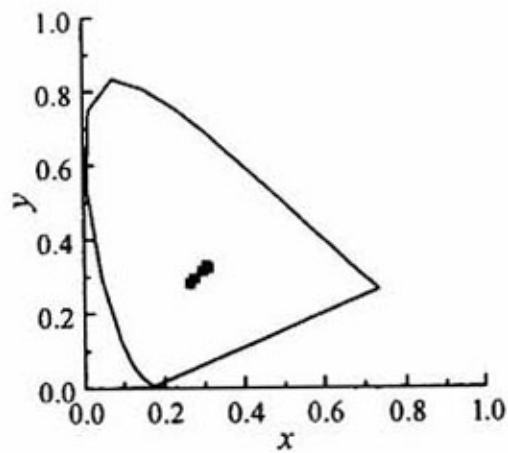
그림 5. 다색 광원에 대한 상면의 반경 변화에 따른 색도 변화.
(a)는 A광원, (b) C광원, (c) D₆₅광원.



(a)



(b)

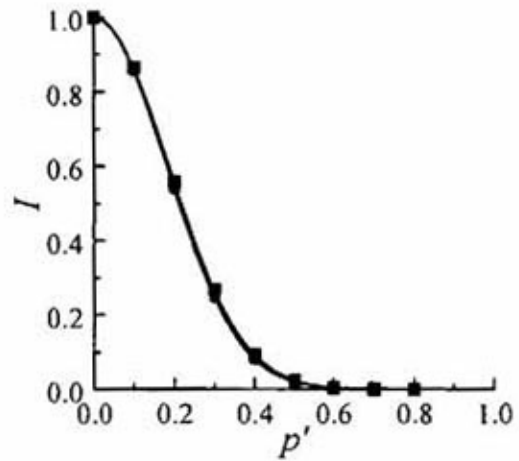


(c)

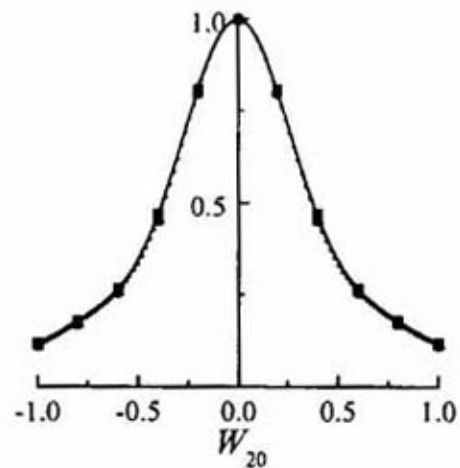
그림 6. 다색 광원에 대한 축상 이동에 따른 색도 변화.
(a)는 A광원, (b) C광원, (c) D₆광원.

가우시안 진폭을 갖는 광학계의 초점 이동에 따른 색도 변화는 기존에 발표된 균일한 진폭을 갖는 광학계의 초점 이동에 따른 색도 변화에 비하여 매우 작게 나타났고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 상면의 반경 변화에 따른 조도 분포와 축상 이동에 따른 조도 분포를 나타내고 있다. 상면과 축상에서 조도 분포는 다색 광원의 종류에 따른 변화가 거의 없음을 알 수 있으며, 이는 상면에서 조도의 차이는 없지만 광학계에 입사되는 다색 광원의 스펙트럼의 분포에 따라 색도 변화에 영향



(a)



(b)

그림 7. 다색 광원에 대한 조도 분포.
(a) 상면 조도 분포, (b) 축상 조도 분포.

을 미침을 그림 4, 5, 그리고 6으로부터 알 수 있다. 특히 기존에 발표된 균일한 진폭을 갖는 광학계의 조도 분포와 비교해 보면 가우시안 진폭을 갖는 광학계에서는 중심 spot의 크기는 증가하면서 1차 sidelobe의 강도가 거의 없기 때문에 단파장쪽으로 급한 색도의 이행이 일어나지 않고 있음을 알 수 있으며, 축상에서도 초점 심도가 균일한 진폭을 갖는 광학계에 비해 크기 때문에 색도 변화가 작음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광학계에 입사되는 입사광의 형태가 가우시안 형태의 진폭을 갖는 경우에 다색 광원에 대한 결상 광학계의 색도 변화와 조도 분포를 조사하였다. 다색 광원의 종류에 따라 기하학 상점에서의 색도 값이 다르게 나타났으며, 기존의 균일한 진폭을 갖는 광학계에 비해 색도 변화가 매우 작게 나타났다. 조도 분포는 다색 광원의 종류에 따라 거의 변화가 없이 나타났으며, 초점 심도가 기존의 균일한 진폭을 갖는 광학계에 비해 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 광학계에 입사되는 다색 광원의 스펙트럼 분포가 광학계의 색도에 큰 영향을 주고 있으며, 광학계에 입사되는 광의 진폭이 가우시안 형태일 때가 균일한 진폭인 경우보다 색도 변화가 작음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 문일권, 심상현 정창섭, 새물리 29, 442(1989).
- [2] 심상현, 정창섭, 한국광학회지, 4, 140(1993).
- [3] 박성중, 이종진, 정창섭, 한국광학회지 4(1), 9(1993).
- [4] 박성중, 심상현, 김재범, 박민경, 최기준, 정창섭, 한국광학회지 6(2), 101(1995).
- [5] S. J. Park and C. S. Chung, Journal of the Korea Physical Society 30(2), 194(1997).
- [6] 김덕훈, 김상문, 김재민, 김창식, 신문균, 시기생리학(한국, 현문사, 1998), p72.
- [7] C. S. Chung and H. H. Hopkins, J. Modern Optics 35, 1485(1988).
- [8] R. A. Meyers, Encyclopedia of Lasers and Optical Technology(미국, Academic Press, Inc., 1990), p33.
- [9] Theme and Variations, Color Measurement (미국, Springer-Verlag, 1981), Chap. 1-2.
- [10] 김재범, 박성중, 심상현, 정창섭, 새물리 35 (3), 304(1995).