



A Study on Methods of Analysis and Evaluation of Blue Light Blocking Tinted Lens using Yellow-tinted Lenses

Mi-Sun Jung and Eun Jung Choi*

Dept. of Optometry, Konyang University, Daejeon 35365, Korea

(Received November 20, 2017; Revised December 20, 2017; Accepted January 9, 2018)

Purpose: Using yellow-tinted lenses prepared for this study and blue light blocking tinted lenses sold on the domestic market, we examined analysis and evaluation methods for the development and performance improvement of tinted blue light blocking lenses. **Methods:** The yellow-tinted lenses were prepared with CR-39 lenses and yellow powder dye, the spectral transmittances of lenses were measured using a UV-Vis spectrophotometer, and the fitting curves related to the tinted time, luminous transmittance and blue light blocking ratio were derived through regression analysis. **Results:** The relationships between the tinted time and luminous transmittance, the tinted time and blue light blocking ratio, and the blue light blocking ratio and luminous transmittance were well fitted with the double exponential decay curve. Using the fitting curves calculated the tinted time, luminous transmittance, and blue light blocking ratio required to produce the blue light blocking lenses intended to be targeted. In addition, using the $R_{BL}-\tau$ chart quickly and easily compared the blue light blocking ratio and luminous transmittance determining the performance of the Blue light blocking lens. **Conclusions:** We suggest that the fitting curves and $R_{BL}-\tau$ chart related to the tinted time, luminous transmittance, and blue light blocking ratio can be usefully utilized in estimating the performance of the blue light blocking lens and expect them to be widely available.

Key words: Yellow-tinted lens, Blue light blocking lens, Luminous transmittance, Blue light blocking ratio, Fitting curve

서 론

435~400 nm를 중심으로 선폭 약 60 nm 정도의 가우스 분포와 유사한 형태를 띠는 빛에 광생물학적 노출한계 (photobiological exposure limit) 이상으로 노출되면 광화학 적 망막손상(photochemical retinal injury)으로 인해 시력 이 약화되고 심하면 실명에도 이르는 것으로 보고되고 있 다.^[1-5] 색상의 관점에서 볼 때 이 대역의 빛은 자색광(400 nm)과 청색광(460 nm) 사이에 있어서 보라빛이 감도는 푸 른빛을 띤다. 이 때문에 이 대역의 빛을 청색광(blue light) 이라 부르며, 이로 인해 발생하는 광화학 적 망막손상의 위 험을 청색광 위험(blue light hazard)이라 한다.^[1,6-8]

이러한 청색광의 일부를 차단할 목적으로 개발된 시력 보호용 렌즈가 청색광차단렌즈(blue light blocking lens)인 데 제조법에 따라 코팅 청색광차단렌즈와 착색 청색광차 단렌즈로 구분한다. 김 등은 시중에서 유통되고 있는 국내 의 41종의 코팅 청색광차단렌즈 및 착색 청색광차단렌즈 에 대한 청색광차단율(blue light blocking ratio, R_{BL})과 시

감투과율(luminous transmittance, τ)을 국제표준에 따라 측 정하고 장단점을 비교하였다. 이에 따르면 대부분의 코팅 청색광차단렌즈는 착색 청색광차단렌즈와 비교할 때 청색 광차단율이 낮기는 하지만 시감투과율이 높고 색상이 무 색에 가까워 일상에서 착용하는데 무리가 없다. 착색 청색 광차단렌즈는 코팅 청색광차단렌즈만큼 시감투과율을 높 이기는 어렵지만 고스트 이미지(ghost image)라고 불리는 반사상이 생기지 않기 때문에 입사되는 청색광의 대부분 을 차단시킬 수 있을 만큼 높은 청색광차단율의 렌즈를 제조할 수 있고, 이용할 수 있는 착색염료 또한 많기 때문 에 다양한 색상의 구현이 가능하다.^[9] 정 등은 일상에서 널리 사용되고 있는 다양한 용도와 색상의 LED 조명을 대상으로 청색광 위험의 지표가 되는 청색광 복사휘도 (blue light radiance)를 측정 후, IEC 62471의 청색광 위 험군 분류(risk group classification from IEC 62471) 기준 에 따라 분류하면서 청색광 노출로부터 시력을 보호하기 위해서는 가급적 CCT가 낮은 조명을 사용하거나 CCT가 높은 조명을 사용해야 한다면 확산판이 부착된 제품이나

*Corresponding author: Eun Jung Choi, TEL: +82-42-600-8425, E-mail: ejchoi@konyang.ac.kr

혹은 밝기를 낮추어 사용할 것을 권장하였다.^[10] 손 등은 다양한 LED 광원을 대상으로 청색광 분포(blue light distribution)를 조사하고, 일상에서 널리 사용되고 있는 LED 광원들에서 방출되는 청색광은 평균파장 450 nm에서 가장 위험도가 크고 그 선폭은 27 nm인 가우스 분포를 갖는다는 것을 밝혀냈다. 그리고 국외 브랜드 청색광차단렌즈는 LED 광원에서 방출되는 청색광을 효과적으로 차단시킬 수 있도록 설계되었지만, 국내 브랜드 청색광차단렌즈는 그렇지 못한 경우가 많다는 점을 통계적으로 입증하면서 국내 브랜드 청색광차단렌즈의 일부는 청색광 차단설계의 변경이 요구된다는 실험결과를 발표하였다.^[11] 하지만 이러한 꾸준한 연구에도 불구하고 아직 해결해야 할 문제들은 산적해 있으며, 그 가운데에서도 특히 착색 청색광차단렌즈와 관련된 연구는 매우 미흡한 실정이라서 집중적이면서 심도 있는 논의가 요구된다.

이러한 필요성을 반영하는 차원에서 본 연구에서는 착색 청색광차단렌즈의 개발 및 성능 극대화에 유용하게 활용할 수 있는 방안에 대하여 논의하고자 한다. 이를 위하여 염색착색법으로 총 11개의 황색착색렌즈(yellow-tinted lens)를 제조하였고 분광투과율을 측정 후, 착색시간과 시감투과율, 착색시간과 청색광차단율, 청색광차단율과 시감투과율 사이의 관계를 대표할 수 있는 맞춤곡선(fitting curve)을 도출하였다. 그리고 이들 맞춤곡선들로부터 이끌어낼 수 있는 청색광차단렌즈 개발 및 성능향상과 관련된 청색광 차단설계, 성능제어, 성능평가, 분석기법 등에 대하여 논의를 하였다. 본 연구에서의 방법과 결과는 환경문제로 발생되는 황사나 미세먼지 등과 관련된 시인성 연구 및 모델의 개발 등에 유용하게 적용될 것이며, 또한 인공수정체로 사용되는 황색안내렌즈(yellow intraocular lens)의 특성을 조사할 때는 물론 야간운전자용 렌즈의 개발이나 평가에도 폭넓게 활용할 수 있다.^[11-14] 본 연구를 계기로 보다 다양한 성능과 기능을 갖춘 착색렌즈와 관련된 다방면의 연구가 진행될 수 있기를 기대한다.

대상 및 방법

1. 대상

중심두께 1.9 mm, 굴절률 1.498, 굴절능 0.00 D인 CR-39 렌즈와 렌즈착색용 황색분발염료(Opti-Safe Lens Dye C250-61 YELLOW, Phantom, USA)를 사용하여 염색착색법으로 11개의 황색착색렌즈를 다음과 같이 제조하였다. 우선, CR-39를 계면활성제로 깨끗이 세척한 후 정수기로 정수한 미지근한 물 1l에 0.5 g의 염료를 녹여 착색용액을 제조하였다. 제조한 착색용액을 착색용기에 붓고 중탕용 항온조에 담긴 다음, 온도를 90°C로 가열한 상태에서

일정하게 유지시켰다. 착색시간은 0.5 min, 1 min, 2 min, 3 min, 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, 45 min, 60 min으로 설정하여 총 11개의 황색착색렌즈를 제조하였다. 착색을 하는 동안 소량의 동일한 온도와 농도를 갖는 착색용액을 주기적으로 보충해줌으로써 착색과정에서 발생할 수 있는 증발이나 농도의 변화를 최소한으로 억제하고자 하였다.^[15]

2. 방법

제조한 11개의 황색착색렌즈들에 대한 가시광선 범위(380~780 nm)에서의 분광투과율(spectral transmittance) $t(\lambda)$ 은 Shimadzu사의 UV-Vis 분광광도계(UV-2450, Japan)로 측정하였다. 시감투과율 τ 과 청색광차단율 R_{BL} 은 식 (1)과 (2)를 이용하여 계산하였다.^[9] 식 (2)의 우측에 있는 두 번째 항은 ANSI Z80.3:2010, EN 1836:2005/A1;2007, KS B ISO 13666:2004 등에서 규정하고 있는 청색광투과율(blue light transmittance)을 나타내는 식이다.^[8-10]

$$\tau = \frac{\int_{380}^{780} t(\lambda)V(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} V(\lambda)S(\lambda)d\lambda} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_{BL} = 100 - \frac{\int_{380}^{780} t(\lambda)B(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} B(\lambda)S(\lambda)d\lambda} \times 100\% \quad (2)$$

여기서 $S(\lambda)$ 은 CIE 표준광원 D65에 대한 분광분포(the spectral distribution of the standard illuminant D65), $V(\lambda)$ 은 주간시에서의 시감효율(the visibility function of the average human eye for daylight vision), $B(\lambda)$ 는 청색광위험함수(blue light hazard function), 그리고 λ 는 파장(nm)이다.^[9]

결과 및 고찰

1. 시감투과율

Fig. 1에 착색하지 않은 렌즈(no-tinted)와 11개의 황색착색렌즈들에 대한 가시광선 범위(380~780 nm)에서의 분광투과율 $t(\lambda)$ 을 나타내었다. 착색하지 않은 렌즈에 대한 분광투과율은 가시광선 전 범위에 걸쳐 거의 일정한데 이는 렌즈의 전면과 후면에서의 반사에 기인하는 것으로 착색된 렌즈에서도 동일하게 나타난다. 반면, 황색착색렌즈들에 대한 분광투과율은 약 500 nm 이하의 단파장 영역에서 급격히 감소하고 있다. 분광투과율에서의 이러한 감소는 착색염료에 의한 광흡수(light absorption)에 기인하는 것으로 흡수되는 대역의 색상이 자색광(400 nm) 및 청색

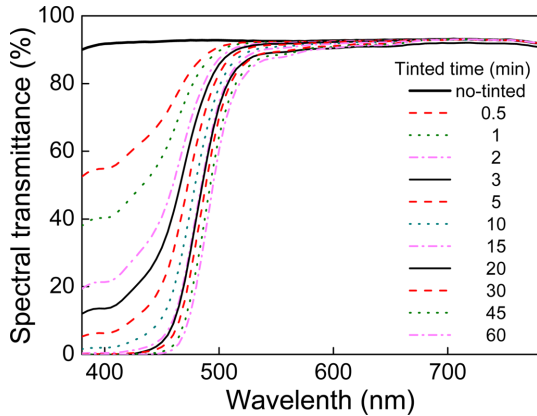


Fig. 1. Spectral transmittances of no-tinted lens and a total of 11 yellow-tinted lenses.

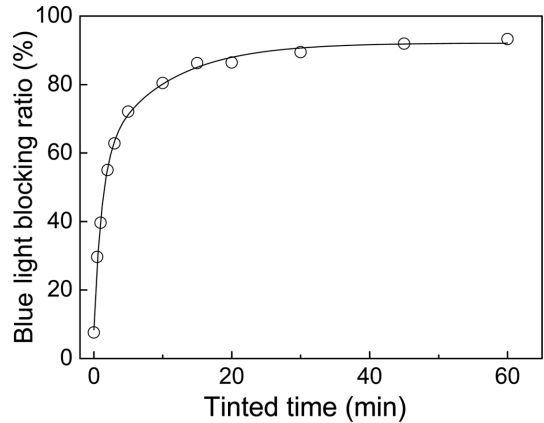


Fig. 3. Relationship between tinted time and blue light blocking ratio for no-tinted lens and a total of 11 yellow-tinted lenses.

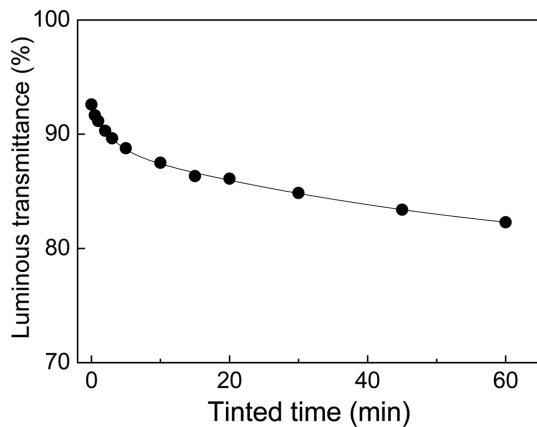


Fig. 2. Relationship between tinted time and luminous transmittance for no-tinted lens and a total of 11 yellow-tinted lenses.

광(460 nm) 영역이기 때문에 렌즈는 그 보색인 황색을 띠게 된다.^[16]

측정한 분광투과율 $t(\lambda)$ 과 식 (1)을 이용하여 착색하지 않은 렌즈와 총 11개의 황색착색렌즈들에 대한 각 착색시간에서의 시감투과율 τ 을 구하였고,^[17] Fig. 2에 그 결과를 ●으로 나타내었다.

Fig. 2에 따르면 τ 은 착색하지 않았을 때 즉, $t=0.0$ min일 때 $\tau=92.6\%$, $t=0.5$ min일 때 91.7% , $t=1$ min일 때 $\tau=91.2\%$, $t=2$ min일 때 $\tau=90.3\%$ 로 착색 초반에는 급히 감소하다가 $t=10$ min일 때는 $\tau=87.5\%$ 로 그 감소세가 둔화되면서 $t=60$ min일 때 $\tau=82.3\%$ 에 이른다. 이처럼 τ 은 착색 초반에는 급격히 감소하다가 착색시간이 증가함에 따라 그 추세가 점차 둔화되는 특징을 보이고 있다.

착색시간과 시감투과율 사이의 관계를 대표할 수 있는 맞춤곡선 $\alpha(t)$ 은 착색렌즈 제조 시 시감투과율의 제어나 착색공정의 자동화 등에 유용하게 사용할 수 있다.^[15] 이러한 맞춤곡선 $\alpha(t)$ 을 도출하기 위하여 이중지수감소곡선

(double exponential decay curve)을 시험곡선(test curve)으로 각 착색시간에서의 시감투과율을 회귀분석(regression analysis) 하였다.^[15,18] 그 결과 식 (3)과 같은 착색시간과 시감투과율 사이의 관계를 대표하는 맞춤곡선 $\alpha(t)$ 을 얻을 수 있었다. 이러한 맞춤곡선 $\alpha(t)$ 을 Fig. 2에 실선(—)으로 나타내었다.

$$\alpha(t) = 78.2169 + (3.5642)e^{-t/2.7914} + (10.6885)e^{-t/62.2075} \quad (3)$$

2. 청색광차단을

식 (2)로부터 계산한 각 착색시간에서의 청색광차단을 R_{BL} 을 ○으로 표시하여 Fig. 3에 제시하였다.

Fig. 3에 따르면 R_{BL} 은 착색하지 않았을 때 즉, $t=0.0$ min일 때 $R_{BL}=7.6\%$, $t=0.5$ min일 때 $R_{BL}=29.6\%$, $t=1$ min일 때 $R_{BL}=39.6\%$, $t=2$ min일 때 $R_{BL}=55.0\%$ 로 착색 초반에는 급격히 증가하다가 $t=10$ min일 때는 $R_{BL}=80.5\%$ 로 그 증가세가 둔화되면서 $t=60$ min일 때는 $R_{BL}=93.3\%$ 에 이르러 렌즈로 입사하는 청색광의 대부분을 차단한다. 이처럼 R_{BL} 은 착색 초반에는 급격히 증가하다가 착색시간이 증가함에 따라 그 추세가 점차 둔화되는 특징을 보이고 있다.

착색시간과 청색광차단을 사이의 관계를 대표할 수 있는 맞춤곡선 $R_{BL}(t)$ 이 주어지면 목표로 하는 청색광차단을 갖는 렌즈를 제조하는데 소요되는 시간을 추정할 수 있다. 이 때문에 청색광차단렌즈의 개발에 있어서 $R_{BL}(t)$ 을 찾아내는 일은 중요하다. 이러한 맞춤곡선 $R_{BL}(t)$ 을 도출하기 위하여 착색시간과 시감투과율 사이의 관계를 대표할 수 있는 맞춤곡선을 도출할 때와 마찬가지로 이중지수감소곡선을 이용한 회귀분석을 시도하였다. 그 결과 식 (4)와 같은 착색시간과 청색광차단을 사이의 관계를 대표하는 맞춤곡선 $R_{BL}(t)$ 을 얻을 수 있었다. 이러한 맞춤곡선

$R_{BL}(t)$ 을 Fig. 3에 실선(—)으로 나타내었다.

$$R_{BL}(t) = 92.1435 + (-49.4386)e^{-t/1.1531} + (-34.2932)e^{-t/9.5303} \quad (4)$$

3. 청색광차단율과 시감투과율

청색광차단렌즈의 성능을 결정하는 가장 중요한 두 변수는 청색광차단율 R_{BL} 과 시감투과율 τ 이다.⁹⁾ 단지 청색광 차단만을 생각하여 R_{BL} 을 높이려는 설계에만 집중한다면 그만큼 렌즈를 통과하는 광량이 줄어들기 때문에 시감투과율 τ 이 감소한다. 따라서 R_{BL} 과 τ 을 적절한 수준에서 조정하는 과정이 필요한데, 이를 위해서는 R_{BL} 과 τ 사이의 관계를 대표할 수 있는 맞춤곡선 $\tau(R_{BL})$ 이 요구된다. 이러한 청색광차단율과 시감투과율 사이의 관계를 대표할 수 있는 맞춤곡선을 도출하기에 앞서 앞 절에서 산출하였던 R_{BL} 과 그에 대응하는 τ 를 ■으로 표시하여 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에 따르면 $R_{BL}=7.6\%$ 일 때 $\tau=92.6\%$, $R_{BL}=29.6\%$ 일 때 $\tau=91.7\%$, $R_{BL}=39.6\%$ 일 때 $\tau=91.2\%$, $R_{BL}=55.0\%$ 일 때 $\tau=90.3\%$ 로 착색 초반에는 서서히 감소하다가 $R_{BL}=80.5\%$ 일 때 $\tau=87.5\%$ 로 그 감소세가 커지면서 $R_{BL}=93.3\%$ 일 때 $\tau=82.3\%$ 에 이른다. 이처럼 τ 은 R_{BL} 이 증가함에 따라 서서히 감소하다가 점차 그 감소세가 커지는 특징을 보이고 있다.

청색광차단율과 시감투과율 사이의 관계를 대표할 수 있는 맞춤곡선 $\tau(R_{BL})$ 은 착색렌즈의 개발과 성능 극대화에 유용하게 사용할 수 있으므로 $\tau(R_{BL})$ 을 찾아내는 일 또한 중요하다. 이러한 맞춤곡선 $\tau(R_{BL})$ 을 도출하기 위하여 앞서와 마찬가지로 이중지수감소곡선을 이용한 회귀분석을 시도하였다. 그 결과 식 (5)와 같은 청색광차단율과 시감투과율 사이의 관계를 대표하는 맞춤곡선 $\tau(R_{BL})$ 을 얻을 수 있었다. 이러한 맞춤곡선 $\tau(R_{BL})$ 을 Fig. 4에 실선(—)으로 나타내었다.

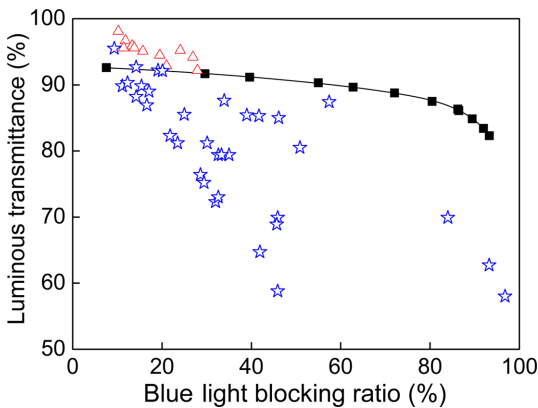


Fig. 4. Relationship between blue light blocking ratio and luminous transmittance for no-tinted lens and a total of 11 yellow-tinted lenses.

$$\tau(R_{BL}) = 94.6094 + (-1.7942)e^{-R_{BL}/-61.6865} + (-1.3901 \times 10^{-7})e^{-R_{BL}/-5.4165} \quad (5)$$

4. 고찰

앞의 세절의 결과를 이용하여 청색광차단렌즈의 성능과 관련된 다음과 같은 고찰을 하였다.

(1) $\tau(t)$ 과 $R_{BL}(t)$ 의 역함수(inverse function)를 이용하면 목표로 하는 시감투과율과 청색광차단율의 렌즈를 제조하는데 걸리는 착색시간을, 그리고 $\tau(R_{BL})$ 을 이용하면 목표로 하는 청색광차단율에서의 시감투과율을 추정해낼 수 있다.

예를 들어, $R_{BL}=20\%$ 을 목표로 한다면 $R_{BL}(t)$ 의 역함수로부터 착색시간은 약 16~17 sec, $\tau(R_{BL})$ 로부터 그 때의 시감투과율은 약 $\tau=92\%$ 임을 계산해낼 수 있다. 마찬가지로 $R_{BL}=50\%$ 를 목표로 한다면 착색시간은 약 92~93 sec, 그 때의 시감투과율은 약 $\tau=90\%$ 임을 계산해낼 수 있다.

(2) 착색 청색광차단렌즈의 성능을 제어할 수 있는 방안을 마련할 수 있다. Fig. 2와 Fig. 3에 따르면 $\tau(t)$ 과 $R_{BL}(t)$ 은 착색 초반에 급격히 변하다가 서서히 둔화된다는 공통적인 특징을 나타내고 있다. 이는 착색시간이 어느 정도 흐르면 τ 과 R_{BL} 의 값은 거의 변하지 않음을 뜻하는 것이다. 따라서 착색시간을 길게 하여도 τ 과 R_{BL} 의 값을 변화시키는 데는 한계가 있기 때문에 적절한 수준에서 통제하는 것이 좋다.

반면, Fig. 4를 보면 맞춤곡선 $\tau(R_{BL})$ 는 $\tau(t)$, $R_{BL}(t)$ 의 추세와는 달리 R_{BL} 이 증가함에 따라 τ 가 초반에는 서서히 감소하다가 후반에는 급격히 감소한다는 특징을 보이고 있다. 이는 R_{BL} 을 어느 정도 높여도 τ 가 크게 영향을 받지 않음을 말해주는 것이다. 다시 말하면 τ 의 큰 손실 없이도 R_{BL} 을 상당히 높일 수 있다는 뜻과 같다.

(1)에서 언급했던 예를 다시 살펴보면 $R_{BL}=20\%$ 일 때 $\tau=92\%$ 이었는데 $R_{BL}=50\%$ 일 때는 $\tau=90\%$ 이었다. 즉, R_{BL} 이 30%나 증가하였음에도 불구하고 τ 는 불과 2%밖에 감소하지 않았다. 이는 시감투과율에서의 큰 손실 없이도 청색광차단율을 높일 수 있다는 가능성을 말해주는 사례로 적절한 수준에서 제어하면 착색 청색광차단렌즈의 성능을 극대화할 수 있다.

(3) 맞춤곡선 $\tau(R_{BL})$ 을 이용하면 청색광차단렌즈의 성능을 결정하는 가장 중요한 변수인 $R_{BL}(t)$ 과 τ 을 빠르고 간편하게 비교할 수 있다. 본 연구에서는 $R_{BL}(t)$ 과 τ 으로 그려지는 도표를 $R_{BL}-\tau$ 차트($R_{BL}-\tau$ chart)라 하겠다. $R_{BL}-\tau$ 차트를 이용한 청색광차단렌즈의 성능비교는 다음과 같은 절차에 따라 할 수 있다.

(ㄱ) 조사할 청색광차단렌즈들에 대한 가시광선 범위에

서의 분광투과율을 측정한 후, 식 (1)과 (2)를 이용하여 τ 과 R_{BL} 을 구한다.

(ㄴ) 얻어진 각 청색광차단렌즈들의 좌표 (R_{BL} , τ)를 R_{BL} - τ 차트에 표시하고, 표시된 좌표들의 위치를 파악하면서 각 청색광차단렌즈들에 대한 τ 과 R_{BL} 의 관계를 비교한다.

(ㄷ) 성능 비교 시에는 다음과 같은 점에 유념하고 평가한다.

(i) R_{BL} 과 τ 의 두 값이 모두 크면 클수록 청색광은 많이 차단되면서 시감투과율은 높다는 뜻이므로 우수한 성능의 청색광차단렌즈라 할 수 있다. 즉, R_{BL} - τ 차트에서 우측상단에 위치하는 렌즈에 대해서는 성능이 우수하다고 평가할 수 있고, 좌측하단에 위치한 렌즈에 대해서는 성능이 열악하다고 평가할 수 있다.

(ii) R_{BL} 이 높아짐에 따라 τ 이 감소하는 경향이 있으므로 청색광차단렌즈들의 좌표 (R_{BL} , τ)들은 좌측상단에서 우측하단 방향으로 대부분 배치될 것이다. 착색시간만을 달리하여 제조한 동일한 색상을 갖는 여러 착색 청색광차단렌즈들의 좌표 (R_{BL} , τ)들에 대한 기울기가 가파를수록 시감투과율이 급격하게 떨어지는 렌즈이다.

(4) R_{BL} - τ 차트를 이용하여 3가지 유형의 청색광차단렌즈 즉, 본 연구에서 제조한 황색착색렌즈, 시중에서 유통되고 있는 코팅 및 착색 청색광차단렌즈에 대한 성능을 비교하였다. 이를 위해 시중에서 유통되고 있는 각 코팅 및 착색 청색광차단렌즈들에 대한 가시광선 범위에서의 분광투과율 $\tau(\lambda)$ 을 측정하였고, 그 결과와 식 (1) 및 (2)를 이용하여 τ 과 R_{BL} 을 구한 다음, 각각의 좌표 (R_{BL} , τ)들을 Fig. 4의 R_{BL} - τ 차트에 나타내었다. 이때 코팅 청색광차단렌즈는 Δ 로, 착색 청색광차단렌즈는 \star 로 나타내었고, 측정된 렌즈들의 개수는 각각 11개와 34개이었다. Fig. 4에 따르면 시중에서 유통되고 있는 청색광차단렌즈들에 대한 좌표 (R_{BL} , τ)는 황색착색렌즈들에 의해 그려지는 맞춤형선 $\alpha(R_{BL})$ 의 상단에 있기도 하고 하단에 있기도 하다. 여기서 Δ 로 표시된 코팅 청색광차단렌즈의 경우는 대부분 $10\% < R_{BL} < 25\%$ 및 $92\% < \tau < 98\%$ 범위에, \star 로 표시된 착색 청색광차단렌즈의 경우는 대부분 $10\% < R_{BL} < 97\%$ 및 $58\% < \tau < 95\%$ 범위에 분포하고 있다.

Fig. 4를 살펴보면 11개의 코팅 청색광차단렌즈에 대한 좌표 (R_{BL} , τ)들의 위치는 모두 맞춤형선 $\alpha(R_{BL})$ 의 상단에 위치해 있다. 이는 동일한 R_{BL} 의 값을 갖는 황색착색렌즈와 비교한다면 코팅 청색광차단렌즈가 더 높은 τ 을 갖는다는 뜻이다. 따라서 동일한 R_{BL} 을 갖는다면 현재 측정된 11개의 코팅 청색광차단렌즈들이 황색착색렌즈들보다 τ 이 더 높은 렌즈라고 평가할 수 있다.

반면, 34개 착색 청색광차단렌즈에 대한 좌표 (R_{BL} , τ)의 위치를 살펴보면 3개 렌즈의 경우는 맞춤형선 $\alpha(R_{BL})$ 의 상단에, 나머지 31개 렌즈의 경우는 $\alpha(R_{BL})$ 의 하단에 위치해 있다. 이는 시중에서 유통되고 있는 대부분의 착색 청색광차단렌즈들은 동일한 R_{BL} 을 갖는 황색착색렌즈와 비교한다면 τ 이 낮다는 뜻이다. 따라서 R_{BL} 의 관점에서 비교하면 본 연구에서 제조한 황색착색렌즈들이 시중에서 유통되고 있는 착색 청색광차단렌즈들보다 τ 이 더 높은 렌즈라고 평가할 수 있다.

Fig. 4에서 시중에서 유통되고 있는 착색 청색광차단렌즈들은 대부분 좌측상단에서 우측하단 방향을 따라 길게 분포되어 있음을 알 수 있다. 이는 R_{BL} 을 높임에 따라 τ 에서의 손실이 발생되고 있음을 뜻하는 것이다. 이때 기울기가 가파른 렌즈들에서 τ 의 손실이 크다고 해석할 수 있다. 이러한 관점에서 볼 때 본 연구에서 제조한 황색착색렌즈들의 경우는 기울기가 가파르지 않고, 따라서 R_{BL} 이 증가하여도 τ 의 손실이 적은 우수한 성능의 렌즈라고 평가할 수 있다.

이처럼 R_{BL} - τ 차트를 이용하면 청색광차단렌즈에서의 성능을 간편하게 비교할 수 있다. 이에 본 연구에서는 청색광차단렌즈의 성능을 평가할 수 있는 하나의 유용한 방법으로 R_{BL} - τ 차트법을 제안한다.

결론

염색착색법으로 11개의 황색착색렌즈를 제조하고 가시광선 범위에서의 분광투과율을 측정한 후, 착색시간과 시감투과율 사이의 관계를 대표하는 맞춤형선 $\alpha(t)$, 착색시간과 청색광차단율 사이의 관계를 대표하는 맞춤형선 $R_{BL}(t)$, 청색광차단율과 시감투과율 사이의 관계를 대표하는 맞춤형선 $\tau(R_{BL})$ 을 도출하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 모든 맞춤형선들은 이중지수감소곡선으로 잘 표현될 수 있다.

(2) 맞춤형선 $\alpha(t)$ 과 $R_{BL}(t)$ 을 이용하면 목표로 하는 시감투과율과 청색광차단율의 렌즈를 제조할 때 소요되는 착색시간을, $\tau(R_{BL})$ 을 이용하면 목표로 하는 청색광차단율에서의 시감투과율을 추정해낼 수 있다.

(3) 청색광차단렌즈의 성능을 결정하는 청색광차단율 R_{BL} 과 시감투과율 τ 으로 그려지는 R_{BL} - τ 차트는 다양한 청색광차단렌즈의 성능을 빠르고 간편하게 비교할 수 있는 하나의 방법이 될 수 있음을 제안하였다.

(4) R_{BL} - τ 차트를 바탕으로 본 연구에서 제조한 황색착색렌즈들과 시중에서 유통되고 있는 코팅 및 착색 청색광차단렌즈를 비교하였다. 이로부터 동일한 청색광차단율

R_{BL} 을 갖는 청색광차단렌즈를 개발할 때는 코팅 청색광차단렌즈가 유리하다는 점, 그리고 본 연구에서 제조한 황색 착색렌즈들은 시중에서 유통되고 있는 대부분의 착색 청색광차단렌즈보다 성능이 우수하다는 점을 알아내었다.

렌즈의 종류와 특성의 다양성, 착색염료의 색상과 고유 특성, 착색과정에서의 농도, 착색시간, 온도, 주위 환경 등의 차이나 변화 등이 모두 착색렌즈의 성능과 맞춤형선에 영향을 미치는 중요한 요인들이라는 점에서 본 연구는 여러 면에서 한계가 있다고 할 수 있다. 하지만 오히려 이러한 요인들이 많은 연구의 주제가 될 수 있다는 점을 고려하면 해결해야 할 연구가 많다는 점에서 긍정적인 면이 더욱 많다. 또한, 실제 현장에서 적용하기에 어려운 면도 있을 것이지만 실제로 제조사에서 사용하는 렌즈와 염료의 종류는 한정되어 있고, 착색환경은 적절한 수준에서 통제할 수 있다는 관점에서 보면 현장적용이 가능하다고 할 수 있다.

이러한 다양한 요인들과 현장적용의 문제점에도 불구하고 본 연구에서 제시한 맞춤형선의 이해와 분석방법은 착색렌즈의 제조나 착색 청색광차단렌즈의 개발에 있어서 많은 유용한 정보를 제공할 수 있다고 사료된다.

본 연구에서 청색광차단 성능을 비교할 때 다루지 못한 요인들로 색채왜곡으로 인한 색채지각 문제와 코팅 청색광차단렌즈에서 나타나는 고스트이미지 등이 있다. 이러한 요인들 또한 청색광차단렌즈의 성능을 좌우하는 중요한 요소들이기 때문에 본 연구에서 제안한 $R_{BL-\tau}$ 차트법과 더불어 청색광차단렌즈의 성능을 동일적으로 평가할 수 있는 새로운 방법이 개발될 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행되었음 [10053045, 기후 환경 변화 대응 운전자 시인성 향상을 위한 색온도 변환 스마트 LED 전조등 제품화/표준화 기술 개발].

REFERENCES

- [1] Son Y, Yang SJ, Kim CJ, Lee GS, Choi SM, Yu YG, Oh SY, Jung MS, Jo AR, Choi EJ. Performance optimization of blue-light blocking lens through analysis of blue light emitted from LED light sources. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2016;21(4):393-400.
- [2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). *Health Phys.* 2004;87(2): 171-186.
- [3] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0.38 to 3 μ m). *Health Phys.* 1997;73(3):539-554.
- [4] Rüdiger M, Maria F, Rodney C, Adele G, Kari J, Carmela M et al. Guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation. *Health Phys.* 2013;105(1):74-96.
- [5] Taylor HR, Muñoz B, West S, Bressler NM, Bressler SB, Rosenthal FS. Visible light and risk of age-related macular degeneration. *Trans Am Ophthalmol Soc.* 1990;88: 163-173.
- [6] Kang S, Hong JE, Choi EJ, Lyu J. Blue-light induces the selective cell death of photoreceptors in mouse retina. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2016;21(1):69-71.
- [7] Sliney DH, Freasier BC. Evaluation of optical radiation hazards. *Appl Opt.* 1973;12(1):1-24.
- [8] Made-in-China.com. Assessment of the unique "blue light" hazard is critical, 2013. [http://resources.made-in-china.com/article/product-industry-knowledge/HxmntgNCFQIT/IEC-EN-62471-for-LED-Lighting-Products\(16 May 2015\)](http://resources.made-in-china.com/article/product-industry-knowledge/HxmntgNCFQIT/IEC-EN-62471-for-LED-Lighting-Products(16%20May%202015)).
- [9] Kim CJ, Choi SW, Yang SJ, Oh SY, Choi EJ. Evaluation of blue-light blocking ratio and luminous transmittance of blue-light blocking lens based international standard. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2014;19(2):135-143.
- [10] Jung MH, Yang SJ, Yuk JS, Oh SY, Kim CJ, Lyu J, Choi EJ. Evaluation of blue light hazards in LED lightings. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2015;20(3):293-300.
- [11] Park HS, Yang SJ, Park SW, Lee CS. Effect of background colors on color visibility in artificial weather conditions. *Autumn Annual Conference of KIIEE 2016.* 2016; 11:34.
- [12] Lee JH, Chu BS. Effect of different tinted ophthalmic lenses on color vision perception. *Korean J Vis Sci.* 2015;17(4): 443-452.
- [13] Rodríguez-Galietero A, Montés-Micó R, Muñoz G, Albarán-Diego C. Comparison of contrast sensitivity and color discrimination after clear and yellow intraocular lens implantation. *J Cataract Refract Surg.* 2005;31(9):1736-1740.
- [14] Olson MD, Miller KM. Implanting a clear intraocular lens in one eye and a yellow lens in the other eye: a case series. *Am J Ophthalmol.* 2006;141(5):957-958.
- [15] Choi EJ, Lee SU, Lee EJ, Yoon MJ, Jeong JH, Kim CJ, Yang GT, Jeong JH, Kim HJ. Empirical fitting curve for luminous transmittance in tinted lenses using superposition of exponential decay curves. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2011;16(3):283-291.
- [16] Benjamin WJ. *Borish's clinical refraction*, 2nd Ed. St. Louis: Butterworth Heinemann Elsevier, 2006;298.
- [17] KSSN(Korean Standards Service Network). *Ophthalmic optics-Spectacles lenses-Vocabulary.* KS B ISO 13666, 2004.
- [18] Choi EJ, Jeong JH, Kim HJ, Seo W, Ju YJ. Tinted-time dependence of the total spectral transmittance in CR-39 plastic color lenses. *New Phys: Sae Mulli.* 2009;59(3): 272-277.

황색착색렌즈를 이용한 착색 청색광차단렌즈의 분석과 평가 방법에 관한 고찰

정미선, 최은정*

건양대학교 안경광학과, 대전 35365

투고일(2017년 11월 20일), 수정일(2017년 12월 20일), 게재확정일(2018년 1월 9일)

목적: 황색착색렌즈와 시중에서 유통되고 있는 청색광차단렌즈를 이용하여 착색 청색광차단렌즈의 개발과 성능향상에 활용할 수 있는 분석법과 평가법에 대하여 알아보았다. **방법:** 황색착색렌즈는 CR-39 렌즈와 황색분말염료를 이용하여 제조하였고, 분광투과율은 분광광도계를 이용하여 측정하였으며, 착색시간, 시감투과율, 청색광차단율과 관련된 맞춤곡선은 회귀분석을 통하여 구하였다. **결과:** 착색시간과 시감투과율 사이의 관계, 착색시간과 청색광차단율 사이의 관계, 청색광차단율과 시감투과율 사이의 관계는 모두 이중지수감소곡선으로 잘 맞췄었다. 맞춤곡선을 이용하여 목표로 하는 청색광차단렌즈를 제조하는데 요구되는 착색시간, 시감투과율, 청색광차단율을 계산해낼 수 있었고, $R_{BL}-\tau$ 차트를 이용하여 청색광차단렌즈의 성능을 좌우하는 청색광차단율과 시감투과율을 빠르고 간편하게 비교할 수 있었다. **결론:** 착색시간, 시감투과율, 청색광차단율과 관련된 맞춤곡선들 및 $R_{BL}-\tau$ 차트는 청색광차단렌즈의 성능을 예측할 수 있도록 해주는 방법으로 유용하게 활용될 수 있음을 제안하며 청색광차단렌즈의 개발과 성능향상에 널리 활용될 수 있기를 기대한다.

주제어: 황색착색렌즈, 청색광차단렌즈, 시감투과율, 청색광차단율, 맞춤곡선