

# Fabrication and Characterization of Coated Blue-Light Blocking Lens

Moonchan Park\*

Dept. of Ophthalmic Optics, Shinhan University, Professor, Uijeongbu 11644, Korea  
(Received August 13, 2020: Revised August 27, 2020: Accepted September 2, 2020)

**Purpose:** The coated blue-light blocking (CBB) lenses were fabricated to study the characteristics changes occurring in the blocking rate at the 450-nm peak wavelength. **Methods:** After designing the CBB lenses using the Essential Macleod program, they were manufactured using an electron beam evaporation apparatus. The blue-light blocking rate, transmittance, luminous transmittance, and colors of the reflected and transmitted light were obtained from the transmittance curve of the CBB lenses. In addition, the structure and composition of the coatings on these lenses were analyzed through XPS. **Results:** For the 450-nm peak wavelength blocking rates of 10%, 20%, 40%, and 60%, the CBB lenses had 16, 18, 26, and 32 layers with blue-light blocking rates of 4.9%, 8.8%, 17.2%, and 25.7%, transmittances of 95.8%, 94.6%, 92.7%, and 90.7%, and luminous transmittances of 99.5%, 98.9%, 98.5%, and 98.0%, respectively. In addition, the color of the transmitted light shifted from transparent to pale yellow with the increase in blue-light blocking rates, and the color of the reflected light gradually changed from blue to dark blue. The XPS analysis verified the consistency of layer thicknesses and components of the CBB lenses with the design values; the  $Ti_3O_5$  layer was composed of  $TiO_2$  and  $Ti_3O_5$ . **Conclusions:** As the blue-light blocking rate of the CBB lenses increased, the number of coating layers was increased, the luminous transmittance slightly decreased, the color of the transmitted light shifted from transparent to pale yellow, and the color of the reflected light gradually darkened from blue.

**Key words:** Blue-light blocking lens, Blue-light blocking rate, Luminous transmittance, CIE chromaticity diagram

## 서 론

Liquid crystal display(LCD) 모니터를 사용하는 휴대폰, 노트북 컴퓨터, 데스크톱 컴퓨터는 backlight로서 light emitting diode (LED)를 사용하는데 스크린을 통해 나오는 LED빛은 다른 파장의 가시광선의 빛에 비해 짧은 파장의 빛인 청색광이 많이 나온다.<sup>[1]</sup> 이러한 청색광과 멜라토닌 분비와의 관계를 연구하기 위해 “대상자가 LED를 backlight로 사용한 컴퓨터 스크린과 backlight로 LED를 사용하지 않은 컴퓨터 스크린에 노출한 경우를 비교하였고, 오렌지색으로 착색하여 청색광을 차단한 안경렌즈를 착용한 사람들과 착색하지 않은 안경렌즈를 착용한 사람들이 LED 스크린에 노출한 경우를 비교하였으며, 오렌지색의 안경렌즈 착용자와 회색 안경렌즈 착용자가 LED 스크린에 노출한 경우를 비교한 결과<sup>[2-4]</sup>로부터 저녁때 오랫동안 청색광에 노출되면 멜라토닌 분비가 억제된다는 것이 보고되었다. 무수정체 안이나 색상이 없고 투명한 인공수정체 안은 에너지가 큰 청색광과 UV-A로 인해 망막이 손상될

위험이 증가된다고 보고되었고.<sup>[5]</sup> 생쥐의 망막에 청색광을 조사하여 실험을 한 결과, 청색광이 광수용세포 중 원뿔세포의 세포사멸을 직접적으로 유도하여 망막 손상을 야기할 수 있다는 가능성을 제시하였고,<sup>[6]</sup> 청광차단렌즈는 나이관련 황반변성의 원인 물질인 A2E의 광산화를 억제하는 효과가 있지만 큰 도움을 줄지는 아직 확신할 수 없으며 많은 연구를 통한 증거들이 나와야 한다고 결론지었다.<sup>[7,8]</sup>

청색광차단렌즈의 청색광 차단율 및 시감투과율을 평가할 때 국제표준에 의거한 청색광 위험함수를 가중함수에 포함시켜야 하며,<sup>[9]</sup> 이러한 가중치를 고려하여 일상생활에서 흔히 접하는 41종의 LED 광원에 대한 청색광 분포를 도출한 결과로부터, 청색광 차단 렌즈가 청색광을 최적으로 차단시킬 수 있는 조건을 제시한 연구<sup>[10]</sup>에 의하면 청색광 차단렌즈는 파장 450 nm를 중심으로 반치폭 27 nm인 가우시안 분포의 형태를 띠어야 한다.

본 연구에서는 청색광 차단 피크 파장과 반치폭을 효과적으로 조절하여 선택적으로 차단시킬 수 있고 시감투과율이 높은 렌즈를 제조할 수 있는 코팅방법을 사용하여 이

\*Corresponding author: Moonchan Park, TEL: +82-32-870-3432, E-mail: mcpark@shinhan.ac.kr  
Authors ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9212-0162

상적인 청색광 차단을 설계한 후,<sup>[11]</sup> 설계 data를 근거로 청색광 차단 렌즈를 제작하였다. 청색광 차단렌즈는 380 nm 이하 자외선은 완전 차단하고, 시감투과율을 최대한 높이고자 480 nm에서 780 nm 사이의 가시광선 투과율은 100%로 유지하여, 청색광 차단에서는 피크 파장은 450 nm로 반치폭은 27 nm인 가우스 분포를 하도록 제작하였다. 이 때, 피크 파장 450 nm에서의 차단율을 10%, 20%, 40%, 60%가 되도록 제작하고 청색광 차단율에 따른 박막의 층수, 청색광 차단율, 투과율, 시감투과율, 반사광과 투과광의 색상변화, 청색광 차단 렌즈의 막의 성분과 구조를 관찰하고자 한다.

## 대상 및 방법

청색광 차단 렌즈를 제작하기에 앞서 Essential Macleod 프로그램을 이용하여 한 면은 청색광 차단 면으로, 다른 면은 가시광선에서 빛이 모두 투과하도록 반사방지막 코팅을 설계하였다. 청색광 차단 면은 피크 파장이 450 nm 이고 반치폭이 27 nm이며 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%인 가우시안 곡선으로 설계하였고, 이 때 설계 기준 파장은 450 nm이었다. 이 데이터를 근거로 청색광 차단 렌즈를 제작하였다.

청색광 차단 렌즈를 제작하기 위해 알코올과 아세톤이 혼합된 용액으로 세척한 지름이 49.4 mm인 원형 BK7 유리 위에 전자 빔 증착 장치(electron beam evaporation, 제한, 1200)를 사용하여 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>박막과 SiO<sub>2</sub>박막을 교번으로 제작하여 반사방지층과 청색광 차단 층을 코팅하였다. 박막 증착 시 온도는 할로젠램프를 이용하여 270°C로 하였으며, 기판을 20RPM으로 회전시켜 박막의 균일도를 유지시켰다. SiO<sub>2</sub> 코팅 증착율(deposition)은 9.0 A/sec이며, 진공도는 2.0×10<sup>-5</sup> torr이었고, Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 코팅 시 O<sub>2</sub> 가스를 공급하였으며 증착율은 3.0 A/sec이며, 코팅 중 진공도는 1.3×10<sup>-4</sup> torr이었다.

분광광도계를 이용하여 BK7 유리 기판의 투과율과 기판위에 코팅된 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>박막과 SiO<sub>2</sub>박막의 투과율을 구한 후, 포락선방법<sup>[12]</sup>을 이용하여 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>박막과 SiO<sub>2</sub>박막의 파장에 따른 광학상수를 구하였다. 이 광학상수를 이용하여 청색광 차단 렌즈를 설계한 후 제작하였다.

제작된 청색광 차단 렌즈는 국제표준에 의거한 청색광 위험함수 가중치<sup>[13]</sup>를 고려한 청색광 차단율(R<sub>BL</sub>), 가시광선에서의 투과율(T), 시감투과율(τ)을 파장 380 nm와 780 nm 사이에서 식 (1)~(3)에 의해서 구하였다.<sup>[9]</sup>

$$R_{BL} = 100 - \frac{\int_{380}^{780} t(\lambda)B(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} B(\lambda)S(\lambda)d\lambda} \times 100(\%) \quad (1)$$

$$T = \frac{\int_{380}^{780} t(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} S(\lambda)d\lambda} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\int_{380}^{780} t(\lambda)V(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} B(\lambda)S(\lambda)d\lambda} \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서,  $t(\lambda)$ 은 렌즈의 분광투과율이고,  $B(\lambda)$ 은 청색광 위험함수이고,  $S(\lambda)$ 은 CIE 표준광원 D65의 분광분포이고,  $V(\lambda)$ 은 주간 시 분광 시감효율이다.

청색광차단렌즈의 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%일 때 반사광과 투과광의 색상을 알기 위해 광원은 형광등을 사용하였다. 반사광인 경우 형광등에서 나온 광선이 청색광차단렌즈에서 반사한 후 스마트폰 카메라로 입사할 때 반사광의 세기가 최대가 되는 각도에서 사진을 찍었다.

청색광 차단렌즈의 필터층의 성분과 구조를 알아보기 위해 XPS(x-ray photoelectronspectroscopy)로 depth profiling 하여 시간에 따른 성분비를 비교하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 반사방지막 코팅 설계 및 제작

Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 박막의 굴절률은 파장 380 nm과 780 nm사이에서 2.22~2.60 정도를 나타내며, 소멸계수는 파장 380 nm에서 약 0.002로 작은 값을 갖다가 파장 570 nm에서는 약 0.00006값으로 아주 작은 값을 갖으며 파장 630 nm 이상에서는 영의 값을 갖는다. SiO<sub>2</sub> 박막의 굴절률은 파장 380 nm과 780 nm사이에서 1.44~1.46 정도를 나타내며, 소멸계수는 가시광선 영역에서 영의 값을 갖는다.<sup>[14]</sup> 이러한 수치를 이용하여 청색광 차단 렌즈의 한 면은 청색광 차단 코팅으로 반대 면은 반사방지막 코팅으로 설계하였는데, 이는 청색광 차단 코팅 반대면에서의 반사를 방지하여 청색광 차단 렌즈의 투과율을 증가시키기 위해서다.

Table 1은 청색광 차단 렌즈의 반사방지막 코팅의 최적 조건이다. 반사방지막 층수는 6층으로 SiO<sub>2</sub>와 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>가 교번으로 쌓여져 있으며 코팅막 전체 두께는 257 nm이다. 이 때 설계 기준 파장은 555 nm이다. 표 안에 QWOT는 1/4 파장 광학 두께(quarter wave optical thickness)이다.

Fig. 1은 코팅 청색광 차단 렌즈의 반사방지막 코팅의 파장 380~800 nm영역에서 분광투과율스펙트럼의 설계치와 실험치이다. 위 곡선은 설계치로 가시광선 영역에서 투과율이 약 99.6%로 거의 무 반사 코팅이며, 아래 곡선은 실제로 제작한 반사방지막의 투과율로 약 95.5%로 차이가 약 4%임을 알 수 있었는데, 이는 한 면만 반사방지막

Table 1. Optimization of the antireflection coating with 6 layers of the coated blue-light blocking lenses

Layer	Material	Extinction Coefficient	Optical	Physical
			Thickness (QWOT)	Thickness (nm)
Substrate	Glass	0		
1	Ti3O5	0.0001	0.275461	16.59
2	DJSiO2	0	0.281226	26.93
3	Ti3O5	0.0001	1.434312	86.41
4	DJSiO2	0	0.076977	7.37
5	Ti3O5	0.0001	0.447028	26.93
6	DJSiO2	0	0.968117	92.72
Medium	Air	0		
Total Thickness			3.483121	256.96

코팅을 했기에 다른 면의 무 코팅에서 반사율에 기인한 것이다. 유리 기관의 굴절률이 1.51854로 반사율은 로 차 이 값과 비슷함을 알 수 있었다.

2. 450 nm 피크 파장 차단율에 따른 투과율 스펙트럼

Table 2는 청색광 차단 렌즈의 청색 차단층의 최적조건 이다. 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60% 일 때는 각각 층수는 16층, 18층, 26층, 32층이고 SiO<sub>2</sub>와 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>가 교번으로 쌓여져 있으며 박막의 두께는 730 nm, 863 nm, 1,214 nm, 1,556 nm이며, 이 때 설계 기준 파장은 450 nm이다. 설계 결과, 피크 파장 차단율이 커짐에 따라 코팅 층수가 점점 커지고 코팅의 전체 두께는 늘어남을 알 수 있었다.

Fig. 2(a)는 450 nm 피크 파장 차단율을 10%, 20%, 40%,

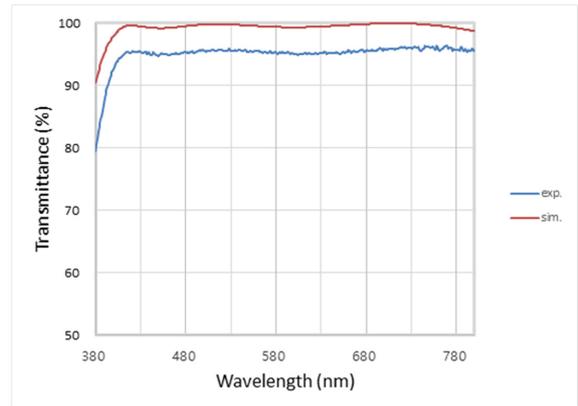


Fig. 1. The experimental and simulation transmittance of the antireflection coating with 6 layers of the coated blue-light blocking lenses.

60%로 설계하였을 때 투과율 스펙트럼이다. 파장 380 nm 이하에서는 완전 차단하고, 파장 380 nm에서 420 nm까지 투과율은 0%에서 급격히 증가하여 약 98%까지 커지다가 420 nm에서 480 nm까지 청색광 차단 곡선으로 가우시안 곡선을 그리는데, 이 때 차단곡선의 최대치인 피크는 450 nm이다. 파장 480 nm이상인 가시광선 영역에서는 거의 투과한다. 이 때 450 nm 피크 파장 차단율이 20%, 30%, 40%로 커짐에 따라 400 nm에서 420 nm사이의 투과율이 약간씩 감소하고 480 nm이상에서 500 nm까지의 가시광선 투과율도 약간 감소함을 알 수 있었다. 그러므로 피크 파 장 차단율이 점차 증가함에 차단 코팅 층수를 점차적으로 늘어나나 480 nm에서 780 nm 사이의 가시광선의 투과율 은 거의 변화하지 않는 것을 알 수 있었다.<sup>[11]</sup>

Fig. 2(b)는 450 nm 피크 파장 차단율을 10%, 20%, 40%,

Table 2. The multilayer structure of the 10%, 20%, 40%, and 60% blue-light blocking rate at the 450 nm peak wavelength

Blue-light blocking rate at the 450 nm peak wavelength (%)	Number of layers	Structure of SiO <sub>2</sub> /Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> multilayer(nm)	Total thickness (nm)
10	16	[air SiO <sub>2</sub> (108) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (42) SiO <sub>2</sub> (26) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (40)  SiO <sub>2</sub> (61) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (21) SiO <sub>2</sub> (70) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (35)  SiO <sub>2</sub> (48) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (33)  SiO <sub>2</sub> (63) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (25) SiO <sub>2</sub> (57) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (31) SiO <sub>2</sub> (53) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (19)  glass]	730
20	18	[air SiO <sub>2</sub> (119) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (36)  SiO <sub>2</sub> (41) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (29)  SiO <sub>2</sub> (83) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (15) SiO <sub>2</sub> (77) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (35)  SiO <sub>2</sub> (48) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (34)  SiO <sub>2</sub> (77) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (19) SiO <sub>2</sub> (69) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (33) SiO <sub>2</sub> (37) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (45) SiO <sub>2</sub> (47) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (21)  glass]	863
40	26	[air SiO <sub>2</sub> (118) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (39)  SiO <sub>2</sub> (33) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (39)  SiO <sub>2</sub> (51) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (28) SiO <sub>2</sub> (67) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (30)  SiO <sub>2</sub> (68) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (30)  SiO <sub>2</sub> (60) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (32) SiO <sub>2</sub> (54) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (27) SiO <sub>2</sub> (73) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (28)  SiO <sub>2</sub> (55) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (44)  SiO <sub>2</sub> (51) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (28)  SiO <sub>2</sub> (76) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (22)?SiO <sub>2</sub> (53) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (39)  SiO <sub>2</sub> (44) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (25)  glass]	1214
60	32	[air SiO <sub>2</sub> (119) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (30) SiO <sub>2</sub> (45) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (20)  SiO <sub>2</sub> (97) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (13) SiO <sub>2</sub> (72) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (36)  SiO <sub>2</sub> (55) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (23) SiO <sub>2</sub> (84) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (17) SiO <sub>2</sub> (62) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (30) SiO <sub>2</sub> (61) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (31) SiO <sub>2</sub> (46) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (133) SiO <sub>2</sub> (37) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (17)  SiO <sub>2</sub> (85) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (32) SiO <sub>2</sub> (27) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (67)  SiO <sub>2</sub> (37) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (21)  SiO <sub>2</sub> (57) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (22) SiO <sub>2</sub> (29) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (105) SiO <sub>2</sub> (22) Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (24)  glass]	1556

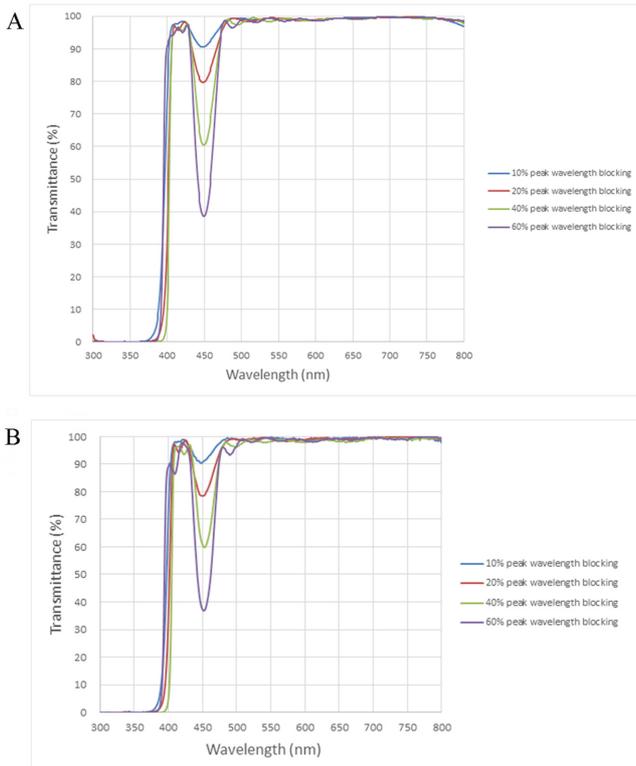


Fig. 2. The (A) simulation and (B) experimental transmittance spectra of the 10%, 20%, 40%, and 60% blue-light blocking rate at the 450 nm peak wavelength.

60%로 설계한 수치를 이용하여 제작한 청색광 차단 렌즈의 투과율 스펙트럼이다. 설계에 의한 투과율 스펙트럼과 거의 비슷하나 450 nm 피크 파장 차단율이 커질수록 청색광 차단 피크 파장이 장파장 쪽으로 조금씩 이동함을 알 수 있었다.

청색광 차단층의 설계치와 실험치를 좀 더 자세히 비교하기 위하여 450 nm 피크 파장 차단율에 따른 차단 피크 파장과 FWHM(full width half maximum)을 Table 3에 표시하였다. 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%일 때 실제 피크 파장은 설계치에서 각각 449 nm, 449 nm, 450 nm, 450 nm이고, 실험치에서는 449 nm, 450 nm, 453 nm, 453 nm이다. 450 nm 피크 파장 차단율이 10%일 때 피크 파장은 설계치를 기준으로 할 때 실험치는 설계

치와 같고 차단율이 20%일 때는 실험치가 1 nm만큼 장파장 쪽으로 이동하였으며, 차단율이 30%일 때와 40%일 때는 피크 파장이 실험치는 3 nm만큼 장파장 쪽으로 이동하였다. 이와 같이 차단율이 커짐에 따라 피크 파장이 장파장 쪽으로 약간 이동하는 것은 차단율이 커짐에 따라 코팅 층수가 많아져 두께가 두꺼워지므로 두께에 대한 오차가 커지는 것에 기인한다고 여겨진다. 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%일 때 FWHM은 설계치에서 각각 33 nm, 32 nm, 27 nm, 29 nm이고, 실험치에서는 각각 32 nm, 35 nm, 27 nm, 31 nm으로 거의 비슷한 수치를 나타낸다.

### 3. 450 nm 피크 파장 차단율에 따른 청색광차단율, 투과율, 시감투과율

450 nm 피크 파장 차단율을 10%, 20%, 40%, 60%로 제작한 청색광 차단 렌즈의 투과율 스펙트럼인 Fig. 2(b) 곡선을 이용하여 국제표준에 의거한 청색광 위험함수 가중치를 고려한 청색광 차단율( $R_{BL}$ ), 가시광선에서의 투과율( $T$ ), 시감투과율( $\tau$ )을 파장 380 nm와 780 nm 사이에서 식 (1)~(3)에 의해서 구하였다. 계산 결과, Table 4와 같이 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%일 때 청색광 차단율은 각각 5.2%, 11.4%, 18.1%, 27.6%이며 가시광선에서의 투과율은 각각 95.2%, 92.8%, 90.1%, 89.6%이며 시감투과율은 각각 99.0%, 98.5%, 97.8%, 97.3%이었다. 이러한 수치는 청색광 차단율이 5.2%에서 27.6%로 5배 이상 청색광을 차단시켰을 때 투과율과 시감

Table 4. The blue-light blocking rate and transmittance and luminous transmittance of the 10%, 20%, 40%, and 60% blue-light blocking rate for the 450 nm peak wavelength

Blue-light blocking rate for the 450 nm peak wavelength (%)	Blue-light blocking rate(%)	Transmittance (%)	Luminous Transmittance (%)
10	5.2	95.2	99.0
20	11.4	92.8	98.5
40	18.1	90.1	97.8
60	27.6	89.6	97.3

Table 3. The peak wavelength and FWHM for the 10%, 20%, 40%, and 60% blue-light blocking rate at the 450 nm peak wavelength

Blue-light blocking rate for the 450 nm peak wavelength (%)	Simulation data of peak wavelength (nm)	Experimental data of peak wavelength (nm)	Error (experimental data-simulation data) (nm)	Simulation data of FWHM at peak wavelength (nm)	Experimental data of FWHM at peak wavelength (nm)	Error (experimental data-simulation data) (nm)
10	449	449	0	33	32	-1
20	449	450	+1	32	35	3
40	450	453	+3	27	27	0
60	450	453	+3	29	31	2

투과율의 변화는 각각 5.6%, 1.7% 감소로 약간의 변화만 있는 것으로 나타났다.

**4. 450 nm 피크 파장 차단율에 따른 반사색, 투과색의 변화**

Fig. 3은 청색광차단렌즈의 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%일 때 투과광과 반사광의 색상을 알기 위해 Fig. 2(b)의 투과율 스펙트럼 곡선과 반사율 스펙트럼 곡선을 OSRAM에서 개발한 Colorcalculator<sup>[14]</sup> 프로그램에 입력하여 얻은 결과이다. Fig. 3에서 x, y는 CIE 색도좌표 x, y이며 오른쪽 위부분과 왼쪽 부분에 CIE 색공간 가장자리에 있는 수치는 색상에 대한 파장을 나타낸다. 청색광차단렌즈에서 투과광의 CIE 색도좌표는 청색광차단렌즈의 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%일 때 (0.3366, 0.3394), (0.3418, 0.3478), (0.3483, 0.3571), (0.3584, 0.3753)로 450 nm 피크 파장 차단율이 증가함에 따라 CIE 색도좌표 x, y값이 둘 다 증가하고, 투과광의 색온도는 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%일 때 5315K, 5119K, 4900K, 4638K로 450 nm 피크 파장 차단율이 증가함에 따라 색온도가 감소한다. 이러한 CIE 색도좌표와 색온도로부터 450 nm 피크 파장 차단율이 10%일 때 투명한 색에서 차단율이 커짐에 따라 옅은 노랑으로 이동함을 알 수 있었다.

청색광차단렌즈에서 반사광의 색상은 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%일 때 색도좌표가 각각

(0.2178, 0.1184), (0.1894, 0.0862), (0.1806, 0.0790), (0.1696, 0.0593)으로 450 nm 피크 파장 차단율이 커짐에 따라 CIE 색도좌표 x, y값이 둘 다 감소하여 처음에는 색상이 청색에서 점점 진한 청색으로 변하는 것을 알 수 있었다. 이는 450 nm 피크 파장 차단율이 커짐에 따라 450 nm 파장에서의 반사광의 세기가 커져 색상이 점점 더 진한 청색으로 이동함을 알 수 있었으며 청색광차단렌즈 제작 시 피크파장 450 nm가 약간 장파장 쪽으로 이동되는 현상도 진한 청색으로 이동하는데 부분적으로 관여되었다고 여겨진다.

**5. 청색광 차단 렌즈의 XPS 분석**

Fig. 4는 450 nm 피크 파장 차단율이 60%인 청색광 차단렌즈의 필터층을 XPS로 depth profiling한 data로, x축은 에칭시간이며, y축은 Si, Ti, O의 atomic%(at%)이다. 청색광 차단렌즈의 필터층을 약 10초정도 에칭하여 표면의 불순물을 없앴으며, 이 후 시료를 10,000초 동안 에칭하면서 깊이에 따른 성분조성비를 관찰한 것이다. 처음에 34at% 일정한 값을 유지하는 선은 Si를 나타내는 선으로 1,300초에서 갑자기 감소하기 시작하다 1,500초정도에서는 거의 없어지고 이 후 다시 급격히 증가하다가 2,000초에서 33a%에 도달한 후 다시 급격히 감소하여 37at%에 도달한다. 이와 같은 양상으로 증가와 감소를 반복적으로 10,000초까지 한다. 반면 처음에 0at%를 유지하는 선은 Ti를 나타내는 선을 1,300초에서 급격히 증가하고 1,800초에서 37at%로 최대치에 도달한 후 급격히 감소하여 2,200초에서는 거의 없어지다가 급격히 증가하여 2,600초에서 34at%에 도달 후 급격히 감소하는 형태를 취한다. 이와 같은 양상으로 증가와 감소를 반복적으로 10,000초까지 한다. O를 나타내는 선은 비교적 변화가 적는데 62at%~

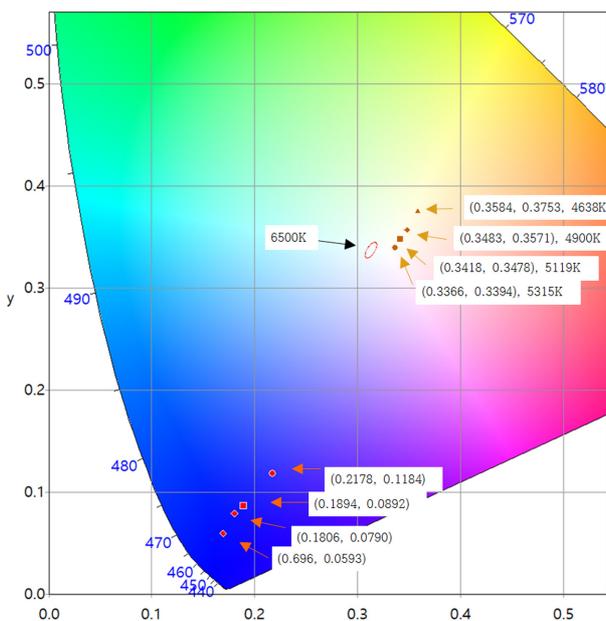


Fig. 3. CIE chromaticity of transmittance and reflectance spectra for the 10%, 20%, 40%, and 60% blue-light blocking rate at the 450 nm peak wavelength.

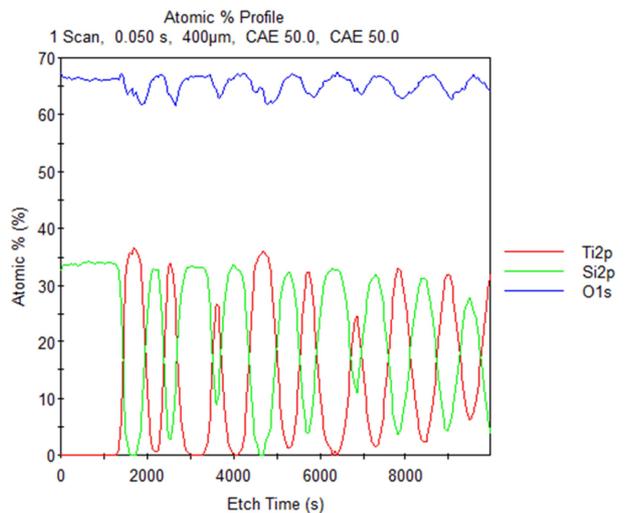


Fig. 4. XPS depth profiles of the blue-blocking lens at 60% blue-light blocking rate for the 450 nm peak wavelength.

67at%를 유지한다.

청색광 차단렌즈의 필터층의 맨 위층은 Si와 O의 비가 34:67로 거의 1:2임을 알 수 있었다. 그러므로 맨 위층은 SiO<sub>2</sub>로 이루어져 있으며 그 아래층은 Ti와 O의 at% 비는 약 36:63으로 TiO<sub>2</sub>와 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>가 혼합된 조성비로 이루어져 있으며 좀 더 자세한 분석은 아래 high resolution scan에서 다루고자한다. 이로부터 청색광 차단렌즈의 필터층은 맨 위층이 SiO<sub>2</sub>층으로 그 아래층들의 구조는 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>막과 SiO<sub>2</sub>막이 교번으로 쌓여있다는 것을 알 수 있었다. 또한 에칭시간은 맨 위층에서부터 SiO<sub>2</sub> 층은 약 1,200초, Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 층은 500초, SiO<sub>2</sub> 층은 약 400초, Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 층은 약 300초인데, 이로부터 맨위 SiO<sub>2</sub>층과 세 번째 SiO<sub>2</sub>층의 두께 비는 약 12:4이고, 두 번째 TiO<sub>2</sub>층과 4번째 TiO<sub>2</sub>층의 두께는 5:3 이라는 것을 알 수 있는데, 이는 설계치(SiO<sub>2</sub> 두께의 비 119:45, TiO<sub>2</sub> 두께의 비 30:20)와 비슷함을 알 수 있었다.

또한 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 박막의 Ti 2p 스펙트럼을 자세하게 관찰하기 위해 high resolution scan을 하였다. x축은 binding energy (eV)이며, y축은 counts(arbitrary unit)/s이다. 네 개의 peak이 관찰되었는데, 이 중 두 개의 peak인 458eV 근처의 peak와 463eV 근처의 peak는 TiO<sub>2</sub>의 Ti 2p<sub>2/3</sub>와 Ti 2p<sub>1/2</sub>에서 유래되었고,<sup>[15]</sup> 나머지 두 개의 peak인 454eV 근처의 peak와 459eV 근처의 peak는 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>의 Ti 2p<sub>3/2</sub>와 2p<sub>1/2</sub>에서 유래된 것으로 추정할 수 있다.<sup>[16]</sup> 그러므로 박막의 조성은 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 박막과 TiO<sub>2</sub> 박막으로 구성되어 있다고 여겨진다.

## 결 론

Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>박막과 SiO<sub>2</sub>박막을 BK7 유리 기판위에 전자 빔 증착 장치를 사용하여 제작하고 분광광도계를 이용하여 BK7 유리 기판의 투과율과 기판위에 코팅된 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>박막과 SiO<sub>2</sub>박막의 투과율을 구한 후, 포락선방법을 이용하여 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>박막과 SiO<sub>2</sub>박막의 파장에 따른 광학상수를 구하였다. 이 광학상수를 이용하여 청색광 차단 렌즈의 반사방지막층과 청색광 차단 층을 설계한 후 제작하였다.

제작된 코팅 청색광 차단렌즈의 반사방지막층의 투과율은 약 95.5%로 설계치 99.6%와 약 4%의 차이를 나타내는데, 이는 한 면만 반사방지막 코팅을 했기에 다른 면의 무 코팅에서 반사율에 기인한 것이다. 청색광 차단 렌즈의 청색 차단층의 최적조건은 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%일 때는 각각 층수는 16층, 18층, 26층, 32층이고 SiO<sub>2</sub> 와 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>가 교번으로 쌓여져 있으며 박막의 두께는 730 nm, 863 nm, 1,214 nm, 1,556 nm이며, 피크 파장 차단율이 커짐에 따라 코팅 층수가 점점 커지고 코팅의 전체 두께는 늘어남을 알 수 있었다. 청색광 차단

층의 설계치와 실험치 비교에서 차단율이 커짐에 따라 피크 파장이 장파장 쪽으로 약간 이동하는 것은 차단율이 커짐에 따라 코팅 층수가 많아져 두께가 두꺼워지므로 두께가 대한 오차가 커지는 것에 기인한다고 여겨진다.

450 nm 피크 파장 차단율을 10%, 20%, 40%, 60%로 제작한 청색광 차단 렌즈의 투과율 스펙트럼인 국제표준에 의거한 청색광 위험함수 가중치를 고려한 청색광 차단율(R<sub>BL</sub>), 가시광선에서의 투과율(T), 시감투과율( $\tau$ )을 구한 결과, 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%일 때 청색광 차단율은 각각 5.2%, 11.4%, 18.1%, 27.6%이며 가시광선에서의 투과율은 각각 95.2%, 92.8%, 90.1%, 89.6%이며 시감투과율은 각각 99.0%, 98.5%, 97.8%, 97.3%이었다. 이러한 수치는 청색광 차단율이 5.2%에서 27.6%로 5배 이상 청색광을 차단시켰을 때 투과율과 시감투과율의 변화는 각각 5.6%, 1.7% 감소로 약간의 변화만 있는 것으로 나타났다.

청색광차단렌즈에서 투과광의 CIE 색도좌표는 청색광 차단렌즈의 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%일 때 (0.3366, 0.3394), (0.3418, 0.3478), (0.3483, 0.3571), (0.3584, 0.3753)으로 450 nm 피크 파장 차단율이 증가함에 따라 CIE 색도좌표 x, y값이 둘 다 증가하고, 투과광의 색온도는 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%일 때 5315K, 5119K, 4900K, 4638K로 450 nm 피크 파장 차단율이 증가함에 따라 색온도가 감소한다. 이러한 CIE 색도좌표와 색온도로부터 450 nm 피크 파장 차단율이 10%일 때 투명한 색에서 차단율이 커짐에 따라 옅은 노랑으로 이동함을 알 수 있었다.

청색광차단렌즈에서 반사광의 색상은 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%일 때 색도좌표가 각각 (0.2178, 0.1184), (0.1894, 0.0862), (0.1806, 0.0790), (0.1696, 0.0593)으로 450 nm 피크 파장 차단율이 커짐에 따라 CIE 색도좌표 x, y값이 둘 다 감소하여 처음에는 색상이 청색에서 점점 진한 청색으로 변하는 것을 알 수 있었다. 이는 450 nm 피크 파장 차단율이 커짐에 따라 450 nm 파장에서의 반사광의 세기가 커져 색상이 점점 더 진한 청색으로 이동함을 알 수 있었으며 청색광차단렌즈 제작 시 피크 파장 450 nm가 약간 장파장 쪽으로 이동되는 현상도 진한 청색으로 이동하는데 부분적으로 관여되었다고 여겨진다.

450 nm 피크 파장 차단율이 60%인 청색광 차단렌즈의 필터층을 XPS로 depth profiling한 data와 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 박막의 high resolution scan을 한 결과로부터 청색광 차단렌즈의 필터층은 맨 위층이 SiO<sub>2</sub>층으로 그 아래층들의 구조는 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>막과 SiO<sub>2</sub>막이 교번으로 쌓여있다는 것을 알 수 있으며 맨위 SiO<sub>2</sub>층과 세 번째 SiO<sub>2</sub>층의 두께 비는 약 12:4 이고, 두 번째 TiO<sub>2</sub>층과 4번째 TiO<sub>2</sub>층의 두께는 5:3 이라

는 것을 알 수 있었으며,  $Ti_3O_5$  박막의 조성은  $Ti_3O_5$  박막과  $TiO_2$  박막으로 구성되어 있음을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 논문은 2020년도 신한대학교 학술연구비 지원으로 연구되었습니다.

## REFERENCES

- [1] Jacobi JL. TV tech terms demystified, part four: LED backlighting, 2020. <https://www.techhive.com/article/3051792/tv-tech-terms-demystified-part-four-led-backlighting.html>
- [2] Cajochen C, Frey S, Anders D, et al. Evening exposure to a light-emitting diodes(LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. *J Appl Physiol.* 2011;110(5):1432-1438. DOI: <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00165.2011>
- [3] Van der Lely S, Frey S, Garbazza C, et al. Blue blocker glasses as a countermeasure for alerting effects of evening light-emitting diode screen exposure in male teenagers. *J Adolesc Health.* 2015;56(1):113-119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2014.08.002>
- [4] Sasseville A, Paquet N, Sevigny J, et al. Blue blocker glasses impede the capacity of bright light to suppress melatonin production. *J Pineal Res.* 2006;41(1):73-78. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-079x.2006.00332.x>
- [5] Algrever PV, Marshall J, Seregard S. Age-related maculopathy and the impact of blue light hazard. *Acta Ophthalmol Scand.* 2006;84(1):4-15. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0420.2005.00627.x>
- [6] Kang SY, Hong JE, Choi EJ, et al. Blue-light induces the selective cell death of photoreceptors in mouse retina. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2016;21(1):69-76. DOI: <https://doi.org/10.14479/jkoos.2016.21.1.69>
- [7] Park S. Effect of photooxidation of A2E, a lipofuscin in the retina, induced by smartphone light against the photooxidation by blue light blocking lenses. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2018;23(4):511-517. DOI: <https://doi.org/10.14479/jkoos.2018.23.4.511>
- [8] Lawrenson JG, Hull CC, Downie LE. The effect of blue-light blocking spectacle lenses on visual performance, macular health and the sleep-wake cycle: a systematic review of the literature. *Ophthalmic Physiol Opt.* 2017; 37(6):644-654. DOI: <https://doi.org/10.1111/opo.12406>
- [9] Kim CJ, Choi SW, Yang SJ, et al. Evaluation of blue-light blocking ratio and luminous transmittance of blue-light blocking lens based on international standard. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2014;19(2):135-143. DOI: <https://doi.org/10.14479/jkoos.2014.19.2.135>
- [10] Son Y, Yang SJ, Kim CJ, et al. 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. DOI: <https://doi.org/10.14479/jkoos.2016.21.4.393>
- [11] Park M. Design of a coated blue-light blocking lens and study of its optical characteristics according to the blue-light blocking rate. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2019;24(3):301-307. DOI: <https://doi.org/10.14479/jkoos.2019.24.3.301>
- [12] Hwangbo CK, Jin KH, Park DY, et al. Determination of optical constants and thickness of weakly absorbing thin films using an envelope method. *Korean J Opt Photon.* 1992;3(1):1-10.
- [13] KSSN(Korean Standards Service Network). Photobiological safety of lamps and lamp systems-Part 2: Guidance on manufacturing requirements relating to non-laser optical radiation safety. KS C IEC 62471-2, 2014.
- [14] Osram. LED ColorCalculator, 2019. <https://www.osram.us/cb/tools-and-resources/applications/led-colorcalculator/index.jsp>(10 July 2019).
- [15] Moulder JF, Stickle WF, Sobol PE, et al. Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy: a reference book of standard spectra for identification and interpretation of XPS data, 2nd Ed. Minnesota: Physical Electronics, Inc., 1995;72-73.
- [16] Park M, Ko KC, Lee WJ. The fabrication and characteristic for narrow-band pass color-filter deposited by  $Ti_3O_5/SiO_2$  multilayer. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2011; 16(4):357-362.

## 코팅 청색광 차단 렌즈의 제작과 특성 연구

박문찬\*

신한대학교 뷰티헬스사이언스부 안경광학전공, 교수, 의정부 11644

투고일(2020년 8월 13일), 수정일(2020년 8월 27일), 게재확정일(2020년 9월 2일)

**목적:** 코팅 청색광 차단 렌즈를 제작하고, 450 nm 피크 파장 차단율에 따른 특성 변화를 연구하고자 한다. **방법:** Essential Macleod 프로그램을 이용하여 코팅 청색광 차단렌즈 코팅을 설계한 후 전자 빔 증착 장치를 사용하여 청색광 차단 렌즈를 제작하였다. 코팅 청색광 렌즈의 투과율 곡선으로부터 청색광 차단율, 투과율, 시감투과율, 반사광과 투과광의 색상을 얻었다. 또한 이 렌즈의 막의 구조와 성분을 분석하기 위해 XPS를 사용하였다. **결과:** 청색광 차단 코팅은 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%에서 층수가 각각 16층, 18층, 26층, 32층이며, 450 nm 피크 파장 차단율이 10%, 20%, 40%, 60%에서 청색광 차단율은 각각 4.9%, 8.8%, 17.2%, 25.7%이고, 투과율은 각각 95.8%, 94.6%, 92.7%, 90.7%이고, 시감투과율은 각각 99.5%, 98.9%, 98.5%, 98.0%이다. 또한 투과광의 색상은 청색광 차단율이 커짐에 따라 투명한 색에서 옅은 노랑으로 이동하며, 반사광의 색상은 청색에서 점점 진한 청색으로 변하는 것을 알 수 있었다. XPS 분석결과 코팅 청색광 차단렌즈의 층 두께와 성분이 설계치와 일치하며,  $Ti_3O_5$ 층은  $TiO_2$ 와  $Ti_3O_5$ 로 이루어져 있음을 알 수 있었다. **결론:** 청색광 차단 렌즈의 청색광 차단율이 커짐에 따라 코팅 층수는 늘어나고, 시감투과율은 약간 감소하며, 투과광의 색상은 투명한 색에서 옅은 노랑으로 이동하며, 반사광의 색상은 청색에서 점점 진한 청색으로 변하는 것을 알 수 있었다.

**주제어:** 청색광 차단 렌즈, 청색광 차단율, 시감투과율, CIE 색도좌표