

중착 물질 두께 조절을 이용한 색상 렌즈 설계

이덕희* · 류지욱* · 한두희**

Color Lens Design by Changing the Combination of Coating Materials

Duck Hee Lee*, Ji-Wook Ryu* and Doo Hee Han**

요 약 SiO₂와 ZrO₂를 코팅물질로 사용하는 안경 렌즈의 5층 코팅을 설계하였다. 제5층의 두께를 변화시키면서 반사율을 계산하고, RGB의 반사율을 이용하여 반사된 빛의 색상을 시각화하였다. 그 결과 5층의 두께가 5 nm부터 80 nm까지 점점 두꺼워지면서 반사광의 붉은 색상이 점점 감소하였고 80 nm에서 점점 두꺼워질수록 푸른 색상이 증가하였다. 색상의 분석은 Photoshop 5.0을 이용하였다.

Abstract We designed 5 layer coating in using SiO₂ and ZrO₂. We calculated reflectance with changing the thickness of 5th layer and visualized color of reflected light in using reflectance of RGB. by the result, when thickness is increase from 5 nm to 80 nm, red color of reflected light is decreased and increase from 80 nm to 150 nm, blue color of reflected light is increased. we made use of Photoshop 5.0 to analyze colors.

Key Words : thin film, reflectance, color lens

1. 서 론

시중에서 구할 수 있는 칼라렌즈는 표면강화코팅을 하지 않은 플라스틱 렌즈를 안료에 담기두어 안료가 스며들게 하는 방식을 이용해서 만든다. 안료의 종류와 조건에 따라서 색상을 달리 할 수 있지만, 공정 단계에서 색상이 고르게 분포하지 않거나 안료를 섞는 과정에서 화학적인 반응을 일으킬 수도 있어서 색상 관리가 어렵다[9].

칼라렌즈를 만드는 방법으로 코팅 막의 간섭을 이용하는 방법이 있다. 광학코팅이란 광학박막을 지칭하는 말로 렌즈의 투과율과 반사율, 편광상태를 원하는 조건에 맞게 가공하는 것을 의미한다. 또한 코팅 매질과 코팅 조건에 따라서 전자기파 차단, 굽힘 방지, 무반사 등 여러 가지가 특성을 얻을 수 있는데 이때 코팅 막의 간섭에 의해서 선택적으로 빛을 반사시킬 수 있다.

물체에 입사한 빛은 세가지 경로(흡수, 반사, 투과)를 통해 반응한다. 우리가 물체를 보고 색을 인지한다는 것은 물체에서 반사된 빛의 색을 인지하는 것이다.

우리가 사물을 볼 수 있게 하는 가시광선은 파장에

따라서 반사 효과가 다양하게 나타날 수 있다. 일반적으로 가시광선의 파장대역폭이 크기 때문에 파장에 따른 반사율이 달라지며, 이것을 이용하면 특정 파장(색상)을 반사하는 칼라 렌즈를 설계할 수 있고, 야간 운전 시 눈부심 방지용 렌즈와 특정 조명에서 장시간 작업할 때 눈의 자극을 줄일 수 있는 렌즈와 같이 특정 작업환경에서 필터링 효과를 이용한 렌즈도 설계할 수도 있다. 그리고 반사율을 높인다면 선글라스 등의 용도로 사용 할 수 있다.

2. 렌즈의 코팅 설계

박막광학은 1950년 Abeles가 특성행렬을 이용하여 박막 설계의 기본 이론을 확립한 이래 많은 발전을 하고 있다. 특히 개인용 컴퓨터의 출현과 다양한 계산 방법이 등장하여 쉽게 설계를 할 수 있으며 응용이 빠르게 증가하고 있다. 또한 박막의 중착 기술의 발전으로 박막의 광학적, 기계적 특성을 향상시키고 있다.

전자기파가 박막으로 전파할 때, 공기-박막과 박막-기판 경계면에서 전기장과 자기장을 각각 벡터로 나타내면, 두 경계면 사이의 광학 박막은 2×2 특성행렬로 표시할 수 있다. 특성행렬은 한 경계면에서 다음 경계면으로 전기장과 자기장 벡터를 변화시켜주는 전달 행

*Dept. of Physics, Kongju National University

**Dept. of Architectural Engineering, Chungwoon University
Tel: 041-850-8480

렬이다. 일층의 특성행렬은 다음과 같다.

$$M = \begin{pmatrix} \cos g & in^{-1} \sin g \\ iu \sin g & \cos g \end{pmatrix} \quad (1)$$

이때 g 와 u 는 각각

$$g = 2\pi\lambda^{-1}(nd\cos\phi) \quad (2)$$

$$u = \begin{cases} n\cos\psi(S - \text{편광}) \\ n\sec\psi(P - \text{편광}) \end{cases} \quad (3)$$

이며, n 은 매질의 굴절률이고 d 는 막의 두께, ϕ 는 매질로의 입사각이다.

다층에 의한 박막의 특성행렬은 각 층의 특성 행렬을 순서대로 곱한 것과 같고, 반사율은 일층 박막의 반사율과 같은 식을 사용한다.

$$M = M_1 M_2 M_3 \dots M_n \quad (4)$$

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & im_{12} \\ im_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^k M_j \quad (5)$$

다층 박막의 진폭반사율 r , 진폭투과율 τ , 에너지 반사율 R 및 에너지 투과율 T 는 다음과 같이 표현된다.

$$r = \frac{(m_{11} + im_{12}u_s)u_0 - (im_{21} + m_{22}u_s)}{(m_{11} + im_{12}u_s)u_0 + (im_{21} + m_{22}u_s)} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{2u_0}{(m_{11} + im_{12}u_s)u_0 + (im_{21} + m_{22}u_s)} \quad (7)$$

$$R = |r|^2, \quad (8)$$

$$T = \tau\tau^* n_s \cos\phi_s / n_0 \cos\phi_0 \quad (9)$$

여기서,

$$u_o = \begin{cases} n_o \cos\phi_o (S - \text{편광}) \\ n_o \sec\phi_o (P - \text{편광}) \end{cases} \quad (10)$$

$$u_s = \begin{cases} n_s \cos\phi_s (S - \text{편광}) \\ n_s \sec\phi_s (P - \text{편광}) \end{cases}$$

이며, \cos 은 S 편광을, \sec 은 P 편광을 나타낸다.

또한 재료의 흡수를 무시한다면 반사율과 투과율은 상호 보완적이라 할 수 있다.

$$T = 1 - R \quad (11)$$

Substrate(Glass, $n = 1.5185$) 위에 SiO_2 ($n = 1.4599$)와 ZrO_2 ($n = 2.0573$)를 5층 코팅을 하는데 5층의 두께를

Table 1. 5층 코팅 설계

SiO_2	$n = 1.4599$	5 nm~150 nm 변화
ZrO_2	$n = 2.0573$	81.7 nm
SiO_2	$n = 1.4599$	21.7 nm
ZrO_2	$n = 2.0573$	20 nm
SiO_2	$n = 1.4599$	150 nm
substrate	$n = 1.5185$	

5 nm부터 150 nm까지 5 nm 단위로 변화시키면서 반사율을 계산하였다(Table 1). 계산은 Essential 6.2를 사용하였다.

ZrO_2 는 340 nm의 자외선부터 12000 nm의 적외선까지 넓은 파장 영역에서 투과하는 고굴절률 물질이며 내구성이 강하여 다층 박막의 증착에 많이 사용하고 있다. 굴절률은 550 nm에서 2.0573이고 증착조건에 따라 크게 변하며, 두꺼울 경우 공기-박막 경계면 쪽의 굴절률이 박막-기판 경계면 쪽의 굴절률보다 작은 불균인 굴절률 박막을 형성한다.

SiO_2 는 200 nm~4500 nm의 넓은 영역에서 투과하며 굴절률이 낮다. 내구성이 높고 외부 환경에 강해 무반사 코팅, 금속 박막의 보호층 등에 사용되고 있다. 550 nm에서 굴절률이 1.4599이며 증착 방법, 기판온도, 산

Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Physical Thickness
Medium	Air	1.0000	0.0000000	
1	SiO2	1.4599	0.0000000	80.500000
2	ZrO2	2.0573	0.0000034	81.700000
3	SiO2	1.4599	0.0000000	21.700000
4	ZrO2	2.0573	0.0000034	20.000000
5	SiO2	1.4599	0.0000000	150.000000
Substrate	Glass	1.5185	0.0000000	

Figure 1. Essential 6.2에 의한 설계 예

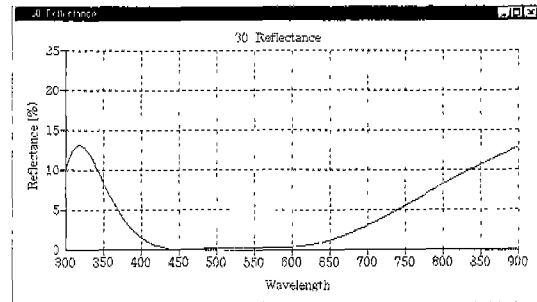


Figure 2. 5층이 80.5 nm일 때의 반사율

소압력 등의 조건에 따라 흡수, 조밀도, 기계적 특성 등이 변한다[1-5].

3. 색의 혼합

색채과학은 Newton이 프리즘을 사용하여 가시광선의 스펙트럼 발견한 것으로부터 시작되었다. 그러나 색을 정량화하는 개념이 실제화된 것은 1931년 CIE colorimetry로부터 라는 점을 감안하면 역사가 그리 오래된 것은 아니다. 이것은 색을 인지하는 것이 상당히 개인적인 경험이고 감각이므로 객관화하는 것이 어렵기 때문이다.

색은 눈에 들어오는 빛의 강도나 성분으로 정해진다. 외부에서 눈으로 입사한 빛은 우선 각막을 통과하게 되는데 대부분의 optical power는 이곳에서 조절된다. 렌즈는 가까운 물체에 대해서는 두께를 줄이고 먼 거리의 물체에 대해서는 두께를 늘임으로서 optical power를 조절하여 초점을 맞춘다. 각막과 렌즈는 바깥의 영상을 눈의 빛 감지층인 망막에 역상으로 맺히도록 하는 역할을 한다. 홍채는 눈으로 들어오는 빛의 양을 조절하여 눈의 감광도를 조절한다. 망막은 간상체(Rods)와 추상체(Cones)로 구성되어 있는데 위치에 따라 민감도가 다르고 세포의 분포도 다르다. 간상체는 한 종류만 있으며 510 nm에서 최대 민감도를 보인다. 이것은 흑백의 명암에만 작용하며 약한 빛에서도 형태를 구분하게 한다.

추상체는 밝은 조명아래에서 색상(Hues)을 감지할 수 있게 해준다. 추상체는 각각 하나의 특징적인 색 감각만을 감지하는데, 그 색 감각물질은 빨강(R), 초록(G), 파랑(B)의 3색이다. 각각의 추상체에 전달된 색감각은 망막의 측면 경로에 의해서 서로 조합되어 완전한 영상으로 우리에게 감지된다.

망막에는 색인식에 관련된 세 종류의 추상체가 있으며 망막 이후의 과정에서도 세 종류의 신호가 만들어진다는 것이 알려져 있다. 색정보를 나타내기 위해서 마찬가지로 세 가지 수치를 사용하는데 이를 삼자극치 XYZ라고 한다. XYZ는 다음 식으로 계산된다.

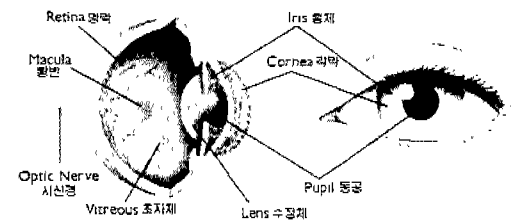


Figure 3. 눈의 구조

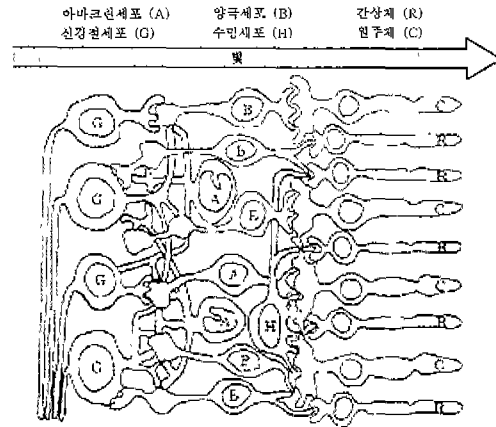


Figure 4. 간상체와 추상체.

$$X = k \int R(\lambda) S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (12)$$

$$Y = k \int R(\lambda) S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (13)$$

$$Z = k \int R(\lambda) S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (14)$$

$R(\lambda)$: 물체의 파장별 반사율

$S(\lambda)$: 광원의 파장 분포

$$k = \frac{100}{\int S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (15)$$

$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$: CIE colour-matching functions

xyz 색상좌표계는 XYZ 삼자극치를 이용하여 다음 식으로 구할 수 있다.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (16)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (17)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} = 1 - x - y \quad (18)$$

삼자극치 값과 color appearance를 연결시키는 방법은 쉽지 않다. 이것은 사람 눈에 감지되는 색이 주변 색이나 눈의 순응(adaptation) 정도에 따라 다르게 보이기 때문이기도 하고 색의 삼차원적 성질 때문에 색들 간의 관계를 한눈에 파악하기란 어렵다. 이 경우 일차원이나 이차원의 경우로 한정시켜 단순화시키는 것이 일반적인 방법이다.

색의 혼합방법에는 두 종류가 있다. 색 필터를 겹치거나 그림물감을 덧칠함으로써 색을 혼합하는 방법을

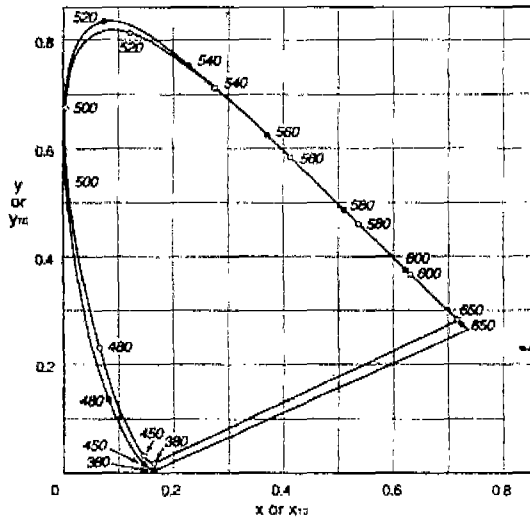


Figure 5. xy 색상도

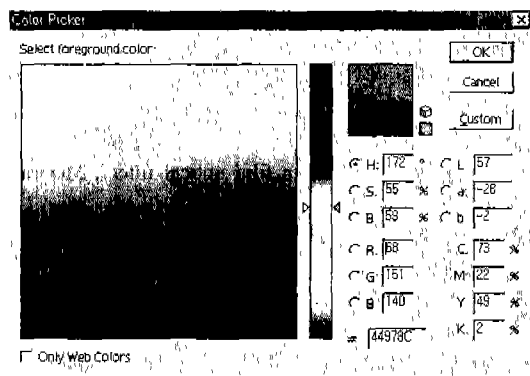


Figure 6. Photoshop의 작업창

감산혼합이라고 한다. 그림이나 컬러 프린트의 경우에 감산혼합을 적용한다.

빨강(R)·초록(G)·파랑(B)의 색광을 이용한 방법을 가산혼합이라고 한다. 각각의 RGB를 여러 가지 세기로 혼합하면 거의 모든 색을 만들 수 있다. 이 3색을 가산혼합의 삼원색이라고 한다. 사람이 색상을 인지하는 것도 이런 원리이며, 컬러TV의 수상기, CCD 카메라, 디지털 카메라, 무대의 조명 등에 이 원리가 사용된다.

디지털 컬러의 경우에 각각의 색상은 0부터 255까지 256등급으로 나누고 각 등급의 RGB값을 이용하여 빛을 혼합한다[6-11].

렌즈에서 반사된 빛은 여러 파장의 빛이 혼합된 것이며 빛의 가산혼합을 적용할 수 있다. RGB의 반사율을 Photoshop에서 적용을 할 수 있도록 변환한 후, 수치를 대입해서 대응되는 색상을 얻었다.

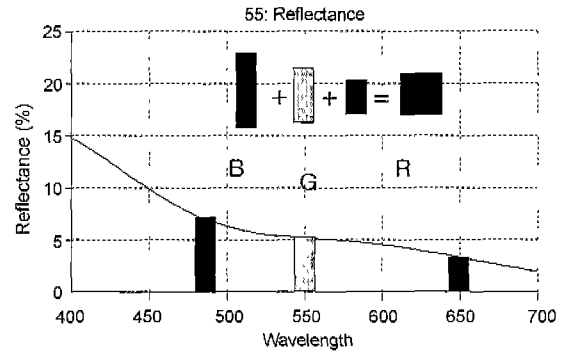


Figure 7. 5층 두께 130 nm에서 반사광의 혼합

4. 결과 및 토의

본 논문에서는 Essential 6.2 프로그램을 이용하여 Substrate(Glass, $n = 1.5185$) 위에 SiO_2 ($n = 1.4599$)와 ZrO_2 ($n = 2.0573$)를 5층으로 설계를 하면서, 5층 SiO_2 의 두께를 5 nm에서 150 nm까지 5 nm 단위로 증가시킨 후 300 nm~900 nm 파장대역에서 반사율을 계산하였다. 이 때의 빛의 입사방향은 0° 이고 기준파장은 550 nm으로 하였다.

기본 색상인 R, G, B의 평균파장을 각각 650 nm, 540 nm, 480 nm로 설정하였고, RGB 각각의 반사율을 256등급으로 환산한 후 Photoshop을 이용하여 색을 합성하였다. Table 2는 5층의 두께에 따른 RGB의 값이고, Figure 8은 두께 변화와 반사광의 색을 나타낸 것이다.

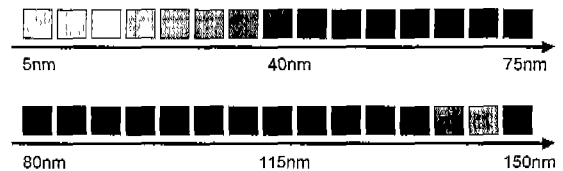


Figure 8. Photoshop을 이용한 두께와 반사광의 시각화

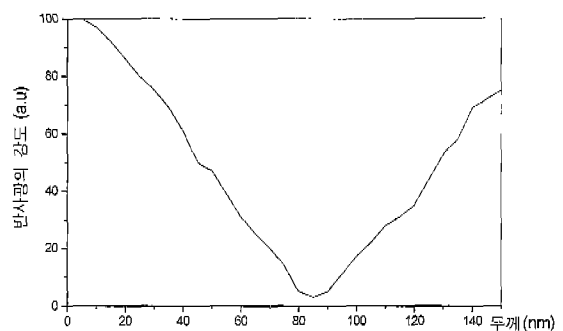


Figure 9. 5층의 두께에 따른 반사광의 강도

Table 2. 제5층 두께에 따른 RGB 값

5층 두께	R	G	B
5 nm	255	184	205
10 nm	248	177	198
15 nm	234	170	191
20 nm	220	156	184
25 nm	205	149	170
30 nm	191	135	156
35 nm	177	120	135
40 nm	156	99	113
45 nm	128	85	99
50 nm	120	71	78
55 nm	99	57	57
60 nm	78	43	43
65 nm	64	28	28
70 nm	50	21	14
75 nm	35	7	7
80 nm	14	0	0
85 nm	7	7	7
90 nm	0	7	14
95 nm	0	14	28
100 nm	7	21	43
105 nm	7	35	57
110 nm	21	50	78
115 nm	7	35	57
120 nm	21	50	78
125 nm	43	78	113
130 nm	57	92	135
135 nm	78	113	149
140 nm	151	128	170
145 nm	156	142	177
150 nm	135	113	191

하지만 반사광의 양이 적은 부분은 실제로 보이는 색상과 다를 수 있다. Table 1의 두께 조건은 무반사 코팅의 설계치이다. 5층의 두께가 80 nm 내외에서는 가시광선의 반사율이 거의 0이기 때문에 색상이 나타나지 않는다. Figure 8에서 두께가 70 nm~90 nm 부분에서 반사광의 색상이 검은색으로 나오는 것은 반사율이 적어서 혼합된 빛의 양이 적기 때문이다. 각각의 두께에서 전체적인 반사광의 강도를 구해보면 Figure 9와 같다. 80 nm 두께를 기준으로 두께가 얇아지거나 두꺼워질수록 반사율이 높아져서 반사광의 강도가 커진다. 이것은 색상이 선명하게 나타남을 뜻한다. 두께가 얇아지면 붉은 색의 반사가 많아지고, 두꺼워지면 푸른 색의 반사가 많아진다. 1~4층의 두께를 고정시키고 5층의 두께만을 변화시킨 후의 반사광은 붉은 색상에서 푸른 색상으로 변화였다. 1~4층의 조건이 달라지면 다른 색상을 얻을 수 있고 변화 양상도 달라질 것이다. 렌즈 표면은 구면이므로 평면 기관과는 달리 특정 색상으로 고정되지 않는다. 또한 광원의 종류와 위치, 관찰 위치에 따라서 색상이 달라질 수 있다.

참고문헌

[1] H. A. Macleod, "Thin film optical filter", McGraw-Hill Book Co., NY, 1989.
 [2] 후지와라 시로유, "박막광학", 울산대학교 출판부, 울산, 1986.
 [3] J. D. Rancourt, "Optical thin films", McGraw-Hill Book Co., New York, 1987.
 [4] 황보창권, "박막광학", 다성출판사, 서울, 2001.
 [5] Frank L. Pedrotti, "Introduction to Optics", Prentice Hall International, 1993.
 [6] <http://colordesign.ewha.ac.kr>
 [7] Wong, Wucius, "색채 디자인의 원리", 청우출판사, 서울, 1990.
 [8] Overheim, R. Daniel, "Light and color", John and Son, New York, 1982.
 [9] 한두희, 한국산학연논문집, 2(1), 2002.
 [10] 박영신, 우정원, 물리학과 첨단기술, 9(11), 18-32, 2000.
 [11] <http://www.color.org>.