

# 전자 빔 증착에 의한 안경렌즈의 박막 코팅에 관한 연구

김종태 · 김지홍 · 김원호\*

부경대학교 화상정보공학부, 서남대학교 물리학과\*

(2000년 1월 20일 접수, 2000년 2월 20일 최종수정본 받음)

## Study on the Optical Thin Film Coating of Glass Lenses Prepared by Electron Beam Deposition

*Jong - Tae Kim, Jee-Hong Kim and Won-Ho Kim\**

Division of Imaging Science and Technology

Pukyong National University

*\*Dept. of Physics, Seonam University*

(Received 20, Jan. 2000, in final form 20, Feb. 2000)

### Abstract

Transmittances of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{ZrO}_2$  thin films, made by the electron beam evaporation method, were measured with a spectrophotometer to be used in determining their optical constants and thicknesses in the envelop method. New color glass lenses with high transmittance, which now can be manufactured in the industry, was successfully designed by using these constants. Also the vacuum evaporator could be mechanically corrected with these constants as correction factors.

## 1. 서 론

광학박막(optical thin films)은 광학 부품의 광학적 특성을 주어진 목적에 맞게 변환시키는 방법으로 널리 사용되고 있다. 광학 박막은 빛의 간섭 효과를 이용하는 것으로서 박막의 두께가 사용하는 빛의 파장정도인 것이 광학에서 많이 이용되고 있다. 즉 반사율을 줄이기 위해 카메라와 안경렌즈에 이용되는 무반사 코팅, 레이저 공진기의 유전체 고 반사막, 특정파장 만 투과시키는 간섭필터 등 여러 가지 종류의 박막계가 광학 소자로서 많은 분야에서 이용되고 있다<sup>1-3)</sup>.

최근 들어 광학, 레이저 및 광자기술이 빠르게 발전함에 따라 중요한 광학 부품으로 사용되는 광학 박막의 과학적 설계와 새로운 증착 기술에 대한 연구개발이 다방면으로 이루어지고 있다. 대부분의 광학 박막은 열악한 외부 환경에서 장시간 사용해야 하기 때문에 광학적 기계적으로 안정적인 특성을 갖는 광학박막의 제작 방법이 필요하며, 이러한 특성의 조사방법에 관한 기초 및 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 박막을 만드는 데는 진공 증착을 이용한 열 저항 가열법이나 전자빔 가열법이 있고, sputtering 방법에는 화학적 증착법이나 arc 또는 glow 방전에 의한 방법등이 있다. 이와 같은 방법으로 박막이 형성되어 가는 과정은 여러 가지 정교한 방법으로 확인한다<sup>4,5)</sup>.

본 논문에서는 최근 들어 소비자들의 다양한 욕구와 새로운 패션 형태의 안경 렌즈의 요구에 의해 각종 color 형태의 안경광학 렌즈의 광학 박막 설계 및 박막 제작시 코팅에 관한 기술적인 측면에 대하여 연구하였으며, 또한 박막의 광학적 특성 분석에 대하여 연구하였다.

## 2. Coating에 사용되는 물질의 광학적 특성

박막의 광학적 특성은 광학상수 들의 쌍으로 표현되는데 주로 사용되는 것이 박막의 굴절률(refractive index)  $n$ 과 소멸계수(extinction coefficient)  $k$ 이다. 유전체 박막의 경우 굴절률은 파장의 함수로서 분산성질을 가지고 있으며, 소멸계수는 매질을 통해 진행되는 빛의 흡수를 나타낸다. 현재 광학상수의 계산에 가장 폭넓게 사용되는 방법은 빛의 편광현상 또는 간섭현상을 이용하고 있다<sup>6)</sup>.

광학상수의 정확한 측정에는 박막의 광학적 기능을 파악하는데 기본적인 요소이므로 각 실험실과 기업체에서 박막의 광학적 상수를 잘 파악하는 것은 매우 중요한 일이다. 그러나 광학상수는 증착 조건, 특히 기판온도, 증착속도, 증착 방법 등에 따라 다른 값을 나타내고, 동일한 박막이라도 측정 파장에 따라 조금씩 차이를 보인다. 따라서 박막의 종류, 특성 등에 적합한 측정 방법을 선택하여야 한다<sup>4)</sup>.

빛의 간섭을 이용하여 광학상수를 측정하기 위한 수많은 방법들이 개발되어져 왔는데 본 실험에서는 포락선 방법(Manifacier et al., 1976)을 이용하였다. 이 방법은 단층박막의 투과율만을 이용하는 것으로 흡수가 작고 균일하며 적당한 두께의 유전체 박막에 적용되며, 박막의 광학적 두께가  $\lambda/4$ 와  $\lambda/2$ 의 정수배인 곳에서 나타나는 최소투과율과 최대투과율을 이어주는 포락선으로부터 박막의 광학상수( $n, k$ ) 및 광학적 두께( $d$ )를 정확히 계산해낼 수 있는 방법이다<sup>7,8)</sup>.

### 3. 이 론

Fig. 1과 같이 복소 굴절률  $N = n - ik$  ( $n$ :굴절률,  $k$ :흡수율)과 두께  $d$ 를 갖는 박막에 수직 입사하는 광의 단위 진폭의 광파를 고려해 보자.

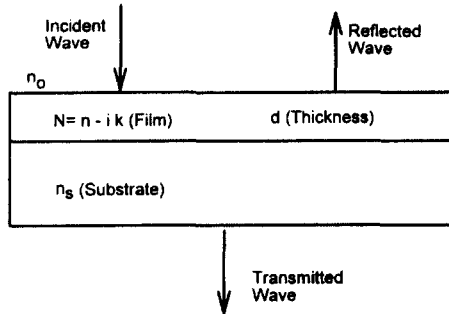


Figure 1. Schematic geometry for optical transmission at normal incidence.

박막에 수직 입사의 경우 투과광의 진폭  $t$ 는 박막 내부에서의 다중반사를 고려하면 다음 식과 같이 주어진다<sup>7,9)</sup>.

$$t = \frac{t_1 t_2 \exp(-i\delta)}{1 + r_1 r_2 \exp(-2i\delta)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $\delta = \frac{2\pi Nd}{\lambda} = \frac{2\pi(n-ik)d}{\lambda}$  이고,  $r_1 = (n_o - n)/(n_o + n)$ ,  $r_2 = (n - n_s)/(n + n_s)$ ,  $t_1 = 2n_o/(n + n_o)$ ,  $t_2 = 2n/(n + n_s)$ 는 각각 박막의 앞면과 뒷면에서의 투과와 반사계수 이고, 아래첨자 1과 2는 각각 공기과 박막, 박막과 기판의 경계면을 나타낸다.

따라서 박막의 투과율  $T = \frac{n_s}{n_o} |t|^2$  는

$$T = \frac{16n_o n_s (n^2 + k^2) \alpha}{A - B \alpha^2 + 2\alpha [C \cos(4\pi nd/\lambda) + D \sin(4\pi nd/\lambda)]} \quad \dots\dots\dots (2)$$

이고, 여기서 계수는 각각

$$\begin{aligned} A &= [(n + n_o)^2 + k^2][(n + n_s)^2 + k^2], \\ B &= [(n - n_o)^2 + k^2][(n - n_s)^2 + k^2], \\ C &= -(n^2 - n_o^2 + k^2)(n^2 - n_s^2 + k^2) + 4k^2 n_o n_s, \quad \dots\dots\dots (2)' \\ D &= 2kn_s(n^2 - n_o^2 + k^2) + 2kn_o(n^2 - n_s^2 + k^2), \\ \alpha &= \exp(-4\pi kd/\lambda) \end{aligned}$$

이다<sup>9)</sup>.

일반적으로 흡수가 매우 작을 경우 즉, 물질의 고유 진동수에서 멀리 벗어난 영역에서는  $k^2 \ll (n^2 - n_o)^2$ 와  $k^2 \ll (n - n_1)^2$ 가 성립하므로 위의 식 (2)은 다음과 같이 보다 간단히 표현할 수 있다.

$$T = \frac{16n_o n_s n^2 \alpha}{C_1^2 + C_2^2 \alpha^2 + 2C_1 C_2 \alpha \cos(4\pi nd/\lambda)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서,

$$C_1 = (n + n_o)(n_s + n), \quad C_2 = (n - n_o)(n_s - n),$$

$$\alpha = \exp(-4\pi kd/\lambda) = \exp(-Kd) \quad \dots\dots\dots (4)$$

이고, K는 박막의 흡수 계수이다. 일반적으로 유전체는 기본적인 흡수 영역 이외에서 n과 k의 분산은 그다지 크지 않다. 한편, 광학적 두께가  $\lambda/4$ 의 정수배 즉,  $nd = m\frac{\lambda}{4}$  ( $m=1,2,3, \dots$ )에서 투과와 반사가 극값을 나타낸다.  $\frac{4\pi nd}{\lambda} = m\pi$ 에서 m은 차수이고, m이 홀수일 때 최대 반사, 최소 투과가 일어나고, m이 짝수일 때 최대투과, 최소반사가 일어난다.

일반적으로  $n > n_s$ 일 때는  $C_2 < 0$  이고, 식 (3)을 최대 투과율( $T_{max}$ )과 최소 투과율( $T_{min}$ )로 나타내면 다음과 같다.

$$T_{max}(\lambda) = \frac{16n_o n_s n^2 \alpha}{(C_1 + C_2 \alpha)^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$T_{min}(\lambda) = \frac{16n_o n_s n^2 \alpha}{(C_1 - C_2 \alpha)^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

Fig. 2, 3에 SiO<sub>2</sub>와 ZrO<sub>2</sub> 단층 박막의 분광투과 곡선의  $T_{max}$ 와  $T_{min}$ 을 볼 수 있다.

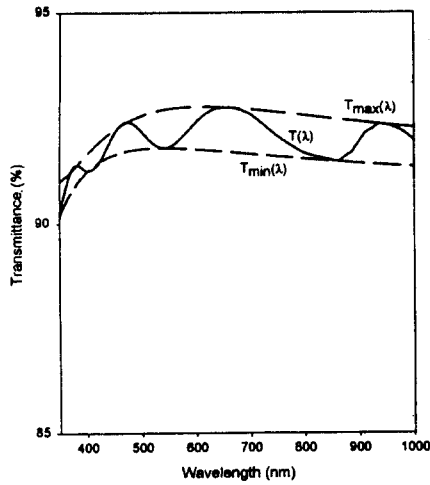


Figure 2. Typical transmission spectrum for a single layer SiO<sub>2</sub> thin film.

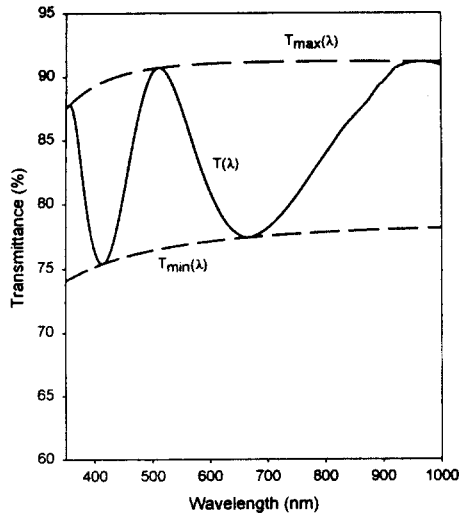


Figure 3. Typical transmission spectrum for a single layer ZrO<sub>2</sub> thin film.

식 (5)과 식 (6)로부터

$$\alpha = \frac{C_1[1 - (T_{\max}/T_{\min})^{1/2}]}{C_2[1 + (T_{\max}/T_{\min})^{1/2}]} \dots\dots\dots (7)$$

이고,  $\alpha$ 를 소거하기 위하여 식(5)과 식(6)을  $\alpha$ 에 대하여 정리한 후, 연립 방정식을 이용하여 계

산하면

$$n^2 = \frac{C_1 C_2}{4n_o n_s} \frac{T_{\max} \times T_{\min}}{T_{\min} - T_{\max}} \dots\dots\dots (8)$$

이고, n에 대하여 정리하면

$$n^4 - 2Sn^2 + n_o^2 n_s^2 = 0 \dots\dots\dots (9)$$

이다. 여기서,

$$S = \frac{1}{2} (n_o^2 + n_s^2) + 2n_o n_s \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} \times T_{\min}}$$

이다. 따라서 식 (9)으로부터 아래와 같이 굴절률 n을 구할 수 있다.

$$n = \sqrt{S + \sqrt{S^2 - n_o^2 n_s^2}} \dots\dots\dots (10)$$

식 (10)에서와 같이 동일한 파장에서의  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$ ,  $n_o$ ,  $n_s$ 로 부터 굴절률 n은 명확하게 구할 수 있다. 박막의 두께 d는 연속되는 두 파장의 최대 또는 최소치로부터 계산할 수 있다. 분광투과 곡선에서 두 인접한 최대 또는 최소 투과율의 파장을 각각  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ 라하고, 그 때의 굴절률을 각각  $n(\lambda_1)$ ,  $n(\lambda_2)$ 라 하면,

$$n(\lambda_1)d = m \frac{\lambda_1}{4} \dots\dots\dots (11)$$

$$n(\lambda_2)d = (m+2) \frac{\lambda_2}{4} \dots\dots\dots (12)$$

이고, 이 두 식으로부터 박막의 두께 d를 구할 수 있다.

$$d = M \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2[n(\lambda_2)\lambda_1 - n(\lambda_1)\lambda_2]} \dots\dots\dots (13)$$

이때 정수 M은 두 극치 사이의 진동회수 이고, 만약 두 극치가 연속된 파장에서 일어난 것이라면 M은 1의 값을 갖는다.

식 (10)과 식 (13)로 부터 n과 d를 구하고 식 (7)로 부터  $\alpha$ 를 구한 다음, 식 (4)을 이용하여 소멸 계수 k를 다음 식과 같이 결정할 수 있다.

$$k = -\frac{\lambda}{4\pi d} \ln \alpha \dots\dots\dots (14)$$

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4-1. 광학박막의 광학 상수 결정

실험에 사용될 박막의 증착조건은 진공도  $2 \times 10^{-5}$  Torr. 이고, 증착 속도는 약 10 Å/sec 로 setting된 자동화된 증착기를 사용하였다. 증착두께는 증착기 내의 quartz crystal 진동자에 의해 실시간으로 박막두께를 측정할 수 있도록 되어있다. SiO<sub>2</sub> 단층 박막의 경우 기계적 측정치와 포락선 방법에 의해 계산된 두께는 약 2%의 오차범위에서 일치함을 알 수 있었고, ZrO<sub>2</sub> 단층박막의 경우는 약 1.3%의 오차를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 이것은 진공 증착기의 구조적 특성에 기인된 요인으로서 실제 코팅시에 기계적 오차를 보정해 줘야 하는 보정인자이다.

광학적 특성은 분광광도계(Perkin Elmer, Lambda-40P)로 측정된 분광 투과 곡선을 이용하여 조사하였고, computer를 이용하여 최대와 최소의 포락선을 결정하여 광학상수 및 두께를 계산하였다.

Fig. 2, 3의 포락선은 Cauchy 분산식을 이용하여 계산에 의해 얻은 분광 투과 곡선으로서 박막의  $\lambda/2$ 와  $\lambda/4$  두께에 대응되는 값으로부터 계산된 결과이다.

$$T(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \frac{D}{\lambda^6} + \dots \quad (15)$$

여기서, 상수 A, B, C, D, ...는 투과율에 대한 최대, 최소의 개수와 같으므로 그 수가 많을 수록 더욱 정확한 값을 얻을 수 있다.

SiO<sub>2</sub>는 가시광 영역에서부터 적외선 영역에 걸쳐 폭넓게 이용되는 물질로서 가시광 영역에서는 저굴절 물질로 사용되고 고굴절 물질인 ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>와 짝을 이루어 진공 증착에 사용된다. Fig. 4는 bulk 상태와 박막 상태의 SiO<sub>2</sub>의 굴절률의 분산곡선을 나타내고 있고, 대표적인 파장에 대한 값은 Table 1에 표시하였다. 또, 소멸계수는 기준파장 550nm에서  $5.53 \times 10^{-5}$  값을 가지고 있음을 알 수 있었다.

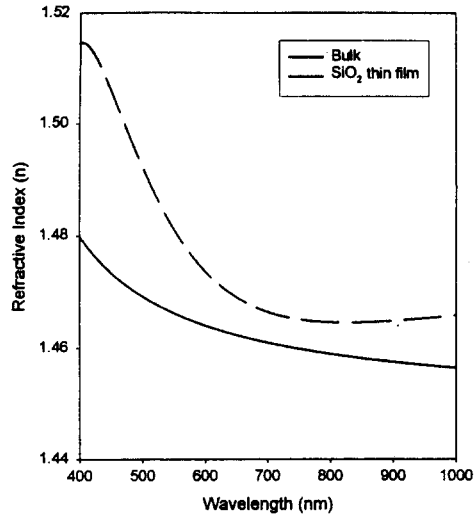


Figure 4. Refractive index dispersion spectra of single layer SiO<sub>2</sub> thin film

Table 1. Index of refraction for the SiO<sub>2</sub> coating materials

	Index of refraction			
	400 nm	500 nm	600 nm	700 nm
Thin film	1.5146	1.4922	1.4737	1.4665
Bulk	1.4799	1.4693	1.4641	1.4610

Fig. 5은 SiO<sub>2</sub>와 박막 코팅시 짝을 이루는 ZrO<sub>2</sub>의 bulk 상태와 박막상태의 파장별 분산 곡선을 나타내고 있다. 상대적으로 SiO<sub>2</sub>와 비교하여 bulk 상태와 박막상태의 굴절률 차이가 전 파장영역에 대하여 균일한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 Table 2에 ZrO<sub>2</sub> 코팅 물질의 중요 파장별 굴절률 값을 비교 표시하였다. 또, 소멸계수는 기준파장 550nm에서  $1.24 \times 10^{-3}$  값을 나타내었다.



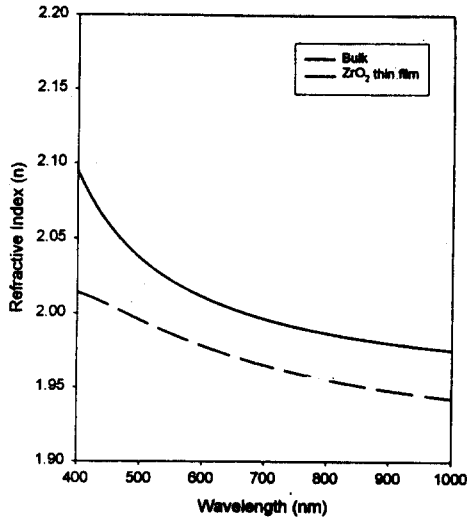


Figure 5. Refractive index dispersion spectra of single layer ZrO<sub>2</sub> thin film

Table 2. Index of refraction for the ZrO<sub>2</sub> coating materials

	Index of refraction			
	400 nm	500 nm	600 nm	700 nm
Thin film	2.0141	1.9956	1.9781	1.9650
Bulk	2.0951	2.0370	2.0109	1.9962

이런 bulk 상태와 박막상태의 광학상수의 차이는 증착조건, 증착속도, 챔버내의 진공도등 여러 요인에 따라 박막의 미세 구조가 변화하기 때문이다<sup>10,11)</sup>.

#### 4-2. 안경 렌즈의 color coating

포락선 방법에 의해 계산된 박막의 광학상수를 이용하여 안경렌즈의 color 코팅설계를 하였다. 일반적으로 전자기파 영역 중에서 우리 눈으로 감각할 수 있는 파장 영역을 가시광선(visible light)이라 하고 보통 380~780nm 영역을 말한다. 무반사 코팅에서는 가시광선 전 파장 영역에 대하여 균일한 투과율을 가지고 있으나, 최근 들어 소비자들의 다양한 요구와 패션형태의 원하는 color 코팅을 하기 위해서 각각의 color에 해당되는 파장에 대한 분광 투과율의 변화를 주어야 한다.

일반적으로 다층막 코팅을 할 경우 기준파장에 대한  $\lambda/4$  코팅을 실시한다. 그러나 가시광선 전 영역에 대하여 균일한 투과율을 가지면서 원하는 색상을 표현하기 위해서는 최적화기법을 통하여 박막 두께를 조정할 필요가 있다. 본 연구에서는 안경렌즈에서 많이 사용되고 있는 박막 코팅 물질

인 저 굴절률 재료로서  $\text{SiO}_2(\text{L})$ 와 고 굴절률 재료로서  $\text{ZrO}_2(\text{H})$ 를 사용하여 초기 값으로서 기판 위에 LHLHL 5층막 코팅을 시행하여 최적화 기법을 통하여 원하는 색상의 color 코팅 안경 렌즈를 설계하였다. 이렇게 설계된 각 박막의 두께는 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Design data of the blue color glass lenses system

#	Layer	Optical Th.	Physical Th.	Material	n
1	L	0.468	176.2	$\text{SiO}_2$	1.45989
2	H	0.082	22.1	$\text{ZrO}_2$	2.04768
3	L	0.087	32.7	$\text{SiO}_2$	1.45989
4	H	0.129	34.6	$\text{ZrO}_2$	2.04768
5	L	0.299	112.7	$\text{SiO}_2$	1.45989

Reference wavelength : 550 nm  
Unit : nm

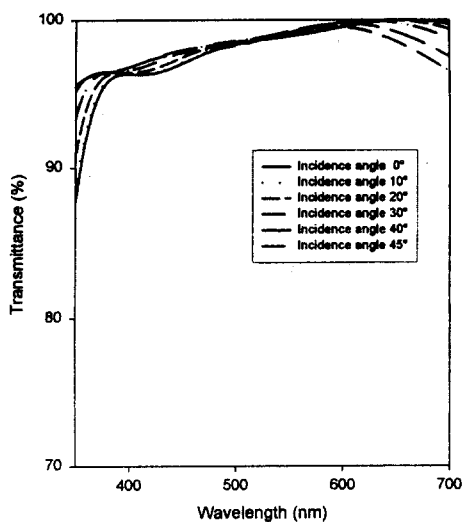


Figure 6. Transmission spectra as a function of wavelength for the five layer thin film

Fig. 6에 이렇게 설계된 안경 코팅 렌즈의 분광투과율 곡선을 각각의 입사각의 변화에 따라 나타내었다. 가시광선 전 파장영역에 걸쳐 모두 높은 투과율을 나타냄을 알 수 있으며, 단파장 영역이 중파장, 장파장 영역에 비하여 투과율이 떨어지는 이유는 본 설계 값이 blue계열의 color를 가지고 있기 때문이다.

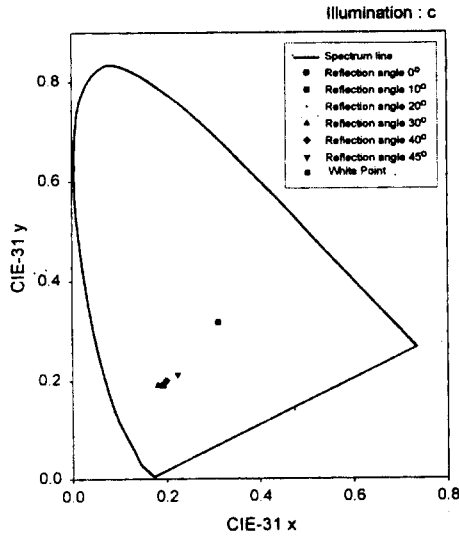


Figure 7. Chromaticity coordinates of the reflection beam angle in the CIE diagram.

Fig. 7는 분광투과율 곡선으로부터 국제 조명위원회 (CIE)의 조명광 C로 조명 했을 때 각각의 반사각에 따른 색도좌표를 CIE xy-색도도 위에 타점한 결과로서 색도 좌표의 평균은 각각  $x_{av}=0.191$ ,  $y_{av}=0.192$  로서 blue color에 해당됨을 알 수 있었다

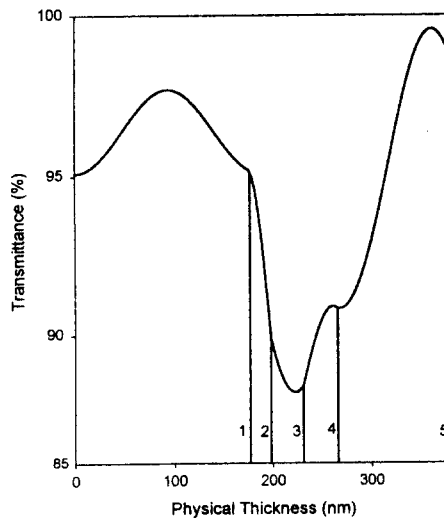


Figure 8. Change of transmittance of the coating thickness for reference wavelength  $\lambda=550\text{nm}$ .

Fig. 8은 코팅 두께에 따른 기준파장 550 nm에 대한 투과율 변화 양상을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 3층까지는 투과율이 감소하다가 제 4층, 5층 코팅에 의해 투과율이 급속히 증가함을 알 수 있으며, 전체 코팅시 막의 두께는 약 378nm이다.

## 5. 결 론

전자빔 증착에 의해  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$  박막 코팅 물질의 광학상수를 빛의 간섭현상을 이용하여 측정된 결과 기준파장 550nm에 대하여 각각 굴절률은 1.48119, 1.9863, 소멸계수는  $5.53 \times 10^{-5}$ ,  $1.24 \times 10^{-3}$ 값을 얻었다. 이렇게 측정된 광학상수를 이용하여 직접 산업체에서 생산하고 있는 색도 좌표가  $x_{av} = 0.191$ ,  $y_{av} = 0.192$ (blue color)이고, 가시광선 파장영역에 대하여 분광투과율이 97% 이상인 안경 렌즈의 코팅 설계 및 제작에 활용하였으며, 또한 증착기기의 기계적 보정인자로 사용 가능하다는 것을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 (주)삼진광학의 협조에 의해 이루어 졌으며 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 이상수, "파동광학", 교학연구사, 78(1985).
2. 한성홍, 김석원, "박막광학", 울산대학교 출판부, 105(1995).
3. 황보창권, 진권희, 박대윤, 이민희, 한국광학회지, 3, 1(1992).
4. H. A. Macleod, "Thin-Film Optical Filters", McGraw-Hill, 412(1986).
5. 황보창권, 송석균, 한국응용물리, 5, 530(1992).
6. J. A. Dobrowolski, F. C. Ho and A. Waldorf, Appl. Opt., 22, 3191(1983).
7. J. C. Manifacier et al., J. Phys. E : Scientific Instrum., 9, 1002(1976).
8. 김형근, "End-Hall형 이온 소스의 제작과 이온 보조 증착된 광학박막의 물성 연구", 울산대학교 석사학위 청구논문(1996).
9. O. S. Heavens, "Optical Properties of Thin Solid Films", Dover, New York 46(1965).
10. D. P. Arndt et. al., Appl. Opt., 23, 3571(1984).
11. D. E. Aspnes and H. G. Craighead, Appl. Opt., 25, 1299(1986).