

Selection of Optical Glasses Using a Chromatic-Aberration Correction Method for the Whole Visible Range Plus a Telecentric Lens Design Applying the Method

Seung Moon Yu[†] and Mee Suk Jung

*Department of Nano-optical Engineering, Korea Polytechnic University,
237 Sangidaehak-ro, Siheung 429-793, Korea*

(Received June 24, 2015; Revised manuscript July 21, 2015; Accepted July 21, 2015)

This paper shows the best selection and combination of glass in lens design, to correct a chromatic aberration using achromatic and apochromatic conditions. Using this research result, we have designed a telecentric lens for machine vision in the full range of visible light. We obtain good optical quality in the form of a quite small RMS wavefront error of 0.057λ in the super-broadband wavelength range 380 nm -780 nm. This result is better than that for a common telecentric lens in the visible wavelength range 486.1-656.2 nm.

Keywords: Achromatic lens, Apochromatic lens, Telecentric lens, Chromatic aberration, Lens design
OCIS codes: (220.3620) Lens system design; (220.0220) Optical design and fabrication; (160.4670) Optical Materials

가시광선 전대역의 색수차보정을 위한 광학유리의 선정과 이를 적용한 텔레센트릭 렌즈의 설계

유승문[†] · 정미숙

한국산업기술대학교 광나노공학과
☎ 429-793 경기도 시흥시 산기대학로 237

(2015년 6월 24일 받음, 2015년 7월 21일 수정본 받음, 2015년 7월 21일 게재 확정)

본 논문에서는 이중 색지움 렌즈와 삼중 색지움 렌즈의 종색수차 보정식을 이용하여 가시광선 전대역에서 수차를 보정할 수 있는 유리 조합을 연구하고 수차가 보정된 두 렌즈를 결합하여 산업 현장에서 광범위하게 이용되고 있는 비전검사용 텔레센트릭 렌즈를 설계하였다. 그 결과 매우 넓은 파장대역 380 nm ~ 780 nm에서 파면수차를 0.057 λ 를 갖는 광학적 성능을 확보하였으며, 이는 기존에 시판중인 486.1 nm ~ 656.2 nm에서 수차가 보정된 텔레센트릭 렌즈들보다 우수하다는 것을 볼 수 있었다.

Keywords: 이중색지움 렌즈, 삼중색지움 렌즈, 텔레센트릭 렌즈, 색수차, 렌즈설계
OCIS codes: (220.3620) Lens system design; (220.0220) Optical design and fabrication; (160.4670) Optical Materials

I. 서 론

최근에 자동차 및 반도체 산업의 발달로 자동화 설비가 일 반화되고 기업체에서 정밀한 측정기와 머신비전용 광학계 에 대한 수요가 높아지고 있는 실정이다. 이 연구에서는 원 근법의 오류가 제거되고 왜곡수차가 보정되어 정밀한 측정 이 가능하여 다양한 검사장비에 이용되고 있는 비전 검사용 텔레센트릭 렌즈를 가시광선 전대역 (380 nm ~ 780 nm)에 서 수차를 보정하고 기존에 시판중인 486.1 nm ~ 656.2 nm

에서 수차가 보정된 렌즈보다 우수한 성능을 얻을 수 있는 렌즈를 설계하였다. 색수차를 보정하는 광학계의 설계에서 광학유리 선정은 가장 중요한 요인이며, 종색수차를 보정하 기 위한 좋은 방법은 파장에 따른 초점거리의 변화량을 계산 하여 이차 스펙트럼을 최소화시키는 것이고, 횡색수차의 보 정은 조리개의 위치와 렌즈의 형상에 의해 보정이 가능하다. 첫 번째로 이중 색지움 렌즈를 Conrady G-sum을 이용하여 얇은 렌즈의 굴절능과 곡률반경을 구하여 종색수차를 최소 화 하는 유리조합을 찾고 두꺼운 렌즈로 변환시켜 종색수차

[†]E-mail: smyu@raeanoptics.com

량과 파면수차로 성능을 분석하였다. 두 번째로 삼중 색지움 렌즈의 설계는 3종의 광학유리의 부분분산과 분산상수를 이용하여 이중 색지움 렌즈와 마찬가지로 굴절능과 곡률반경을 계산하고 종색수차량을 비교하여 가장 좋은 유리조합을 두꺼운 렌즈로 변환하여 파면수차로 성능을 비교하였다. 마지막으로 설계된 두 렌즈를 조리개를 중심으로 대칭형태로 배치하여 1.2 X 텔레센트릭 렌즈를 설계하여 기존에 시판중인 같은 사양의 텔레센트릭 렌즈와 비교하였다. 참고 문헌 [11]에 소개된 유리조합은 3매와 4매 조합의 광속확대기의 구성으로 회절한계로 설계가 되어있고 본 논문에서는 2매와 3매 구성으로 가시광선 전대역에서 수차를 보정하였다.

II. 이중 색지움 렌즈의 설계

2.1. 얇은 이중 색지움 렌즈의 수차보정

물체가 무한대에 있고 초점거리가 f 인 얇은 이중 렌즈에서 분산상수가 ν , 앞의 렌즈를 a, 뒤의 렌즈를 b라 할 때, 렌즈들의 개별 초점거리 f_a 와 f_b 는 다음 식으로 주어진다.^[2]

$$f_a = \frac{(\nu_a - \nu_b)f}{\nu_a} \quad (1)$$

$$f_b = \frac{(\nu_b - \nu_a)f}{\nu_b} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 소재의 굴절률을 각각 n_a , n_b 라고 하면 곡률 C_a 와 C_b 는 다음과 같다.

$$C_a = \frac{1}{f_a(n_a - 1)} \quad (3)$$

$$C_b = \frac{1}{f_b(n_b - 1)} \quad (4)$$

소재의 굴절률을 n 이라고 할 때 Conrady의 G sum 다항식은 아래와 같다.^[2]

$$G_1 = \frac{n^2(n-1)}{2} \quad (5)$$

$$G_2 = \frac{(2n+1)(n-1)}{2} \quad (6)$$

$$G_3 = \frac{(3n+1)(n-1)}{2} \quad (7)$$

$$G_4 = \frac{(n+2)(n-1)}{2n} \quad (8)$$

$$G_5 = 2 \frac{n^2 - 1}{n} \quad (9)$$

$$G_6 = \frac{(3n+2)(n-1)}{2n} \quad (10)$$

$$G_7 = \frac{(2n+1)(n-1)}{2n} \quad (11)$$

$$G_8 = \frac{n(n-1)}{2} \quad (12)$$

3차 구면수차와 코마가 0 이 될 조건은

$$H = (G8b)(C_b^2) - (G8a)(C_a^2) - \frac{(G7b)C_b}{f} \quad (13)$$

$$XI = \frac{(G5a)C_a}{4} \quad (14)$$

$$XK = \frac{(G5a)C_b}{4} \quad (15)$$

$$A = (G1a)C_a^3 + (G1b)C_b^3 - \frac{(G3b)C_b^2}{f} + \frac{(G6b)C_b}{f^2} \quad (16)$$

$$B = -(G2a)C_a^2 \quad (17)$$

$$E = (G4a)C_a \quad (18)$$

$$XJ = (G4b)C_b \quad (19)$$

$$D = (G2b)C_b^2 - \frac{(G5b)C_b}{f} \quad (20)$$

$$P = A + \frac{H \left(\frac{XJ^*H}{XK-D} \right)}{XK} \quad (21)$$

$$Q = B + \frac{XI \left(\frac{2XJ^*H}{XK-D} \right)}{XK} \quad (22)$$

$$R = E + XJ \left(\frac{XI}{XK} \right)^2 \quad (23)$$

$$M = Q^2 - 4P^*R \quad (24)$$

이며 결과적으로 이중 색지움 렌즈의 각각의 1, 2, 3, 4 면의 곡률 c 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$c1 = \frac{-Q + \sqrt{M}}{2R} \quad (25)$$

$$c4 = \frac{-(H + XI * c1)}{XK} \quad (26)$$

$$c2 = c1 - ca \quad (27)$$

$$c3 = cb + c4 \quad (28)$$

2.2. 일반적인 이중 색지움 렌즈의 유리조합

얇은 이중 색지움 렌즈(achromatic doublet)의 수차 분석을 위하여 설계 사양을 참고문헌 [1]의 망원경 대물렌즈의 사양으로 설정하여 종색수차를 보정할 수 있는 유리 조합을 분석하였다.

Figure 1은 부분분산 $P_{F,d}$ 와 분산상수 V_d 로 구성된 유리지도^[7,8]로 Shcott, Ohara, Hoya, Hikari 社의 광학유리의 위치를 나타내고 식 (2-17) ~ (2-20) 으로부터 유도된 각각의 광학유리의 곡률반경과 개별 초점거리, 분산상수와 굴절률을 Table 2와 같이 나타내었다.

Table 2와 Fig. 2에서 1-1 번 NLAK7 / NLASF9 의 조합은 lanthanum crown 계열과 lanthanum dense flint 계열의 조합으로 초점거리의 변화량은 0.81 mm로 유리지도의 중간에 위치하며 분산상수의 차이가 크지 않은 경우로 두 파장에서 초점거리를 일치시킬 수 있는 경우이다.

1-2번 NPK51 / SLAM3 조합은 phosphate crown^[3] 계열과

niobium flint 계열의 조합으로 초점거리의 변화량은 0.28 mm로 분산상수와 부분분산의 차이가 상대적으로 가장 큰 경우이며 두 파장에서 초점거리가 일치되고 1-1번의 조합에 비해 3배 정도는 좋지만 380 nm ~ 780 nm에서 전체 종색수차의 보정은 어려운 경우이다.

1-3번 NBAK4 / NSF4의 조합은 barium crown 계열과 dense flint 계열의 조합으로 유리지도에서 우측에 위치한 조합으로

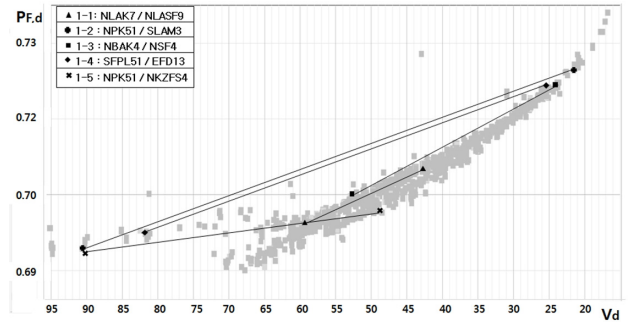


FIG. 1. Location of general achromatic doublet glasses selected in partial dispersion and dispersion glass map.

TABLE 1. Achromatic doublet design specifications

Wavelength	380 nm ~ 780 nm
Focal length	100 mm
F#	8
Field angle	0.4 degree

TABLE 2. The general thin achromatic doublet lens data

Number	Surface	Radius	Glass	Vd	nF	Focal shift
1-1	1	67.63	NLAK7	58.54	1.6593	0.81 mm
	2	-52.97				
	3	-53.87	NLASF9	32.17	1.8690	
	4	-220.84				
1-2	1	61.89	NPK51	76.94	1.5333	0.28 mm
	2	-29.79				
	3	-31.34	SLAM3	47.93	1.7275	
	4	-108.7				
1-3	1	63.85	NBAK4	55.99	1.5759	0.89 mm
	2	-54.58				
	3	-54.07	NSF4	27.38	1.7748	
	4	-162.79				
1-4	1	60.38	SFPL51	81.54	1.5012	0.59 mm
	2	-73.1				
	3	-61.87	EFD13	27.75	1.7598	
	4	-106.68				
1-5	1	61.59	NPSK58	76.94	1.5333	0.22 mm
	2	-35.4				
	3	-35.73	NKZFS4	44.51	1.6230	
	4	-168.04				

결과적으로 1-1 번과 비슷한 초점거리의 변화량을 보이지만 선택된 유리는 분산상수의 차이가 상대적으로 작은 경우라고 할 수 있다.

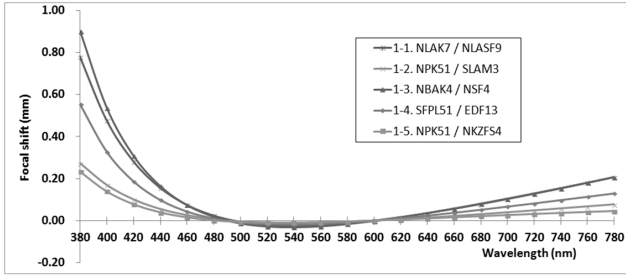


FIG. 2. Focal shift of general thin achromatic doublet lenses.

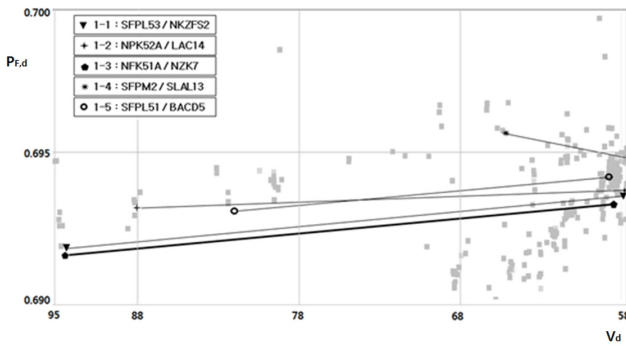


FIG. 3. Glass selection for achromatic doublet on the $P_{F,d} - V_d$ diagram.

1-4번 SFPL51 / EFD13 의 조합은 일반적으로 알려진 fluor crown 계열과 dense flint의 조합으로 1-1번과 1-번 조합의 중간적인 초점거리의 변화량을 보이지만 선택된 유리의 분산상수의 차이가 상대적으로 큰 경우이다.

1-5번 NPSK58 / NKZFS4의 조합은 dense phosphate crown 계열과 special short flint 계열의 조합으로 상대적으로 작은 초점거리의 변화량을 보이고 선택된 유리의 분산상수의 차이가 상대적으로 큰 경우이고 굴절률의 차이는 크지 않다. 여기에서 special short flint 계열은 crown 계열과 조합이 좋아 보임을 알 수 있고 종색수차를 보정할 수 있는 좋은 광학 유리임을 알 수 있다.

2.3. 최적의 이중 색지움 렌즈의 유리조합

Figure 2의 부분분산과 분산상수의 유리지도에서 우측의 전체 영역 중 좌측하단의 부분분산 0.690 ~ 0.700 영역과 분산상수 58 ~ 95 사이의 유리지도를 확대하여 종색수차를 보정할 수 있는 유리 조합의 영역을 분석한 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

아래의 (1-6) ~ (1-10) 조합들은 1-5 번에서 제시한 fluor crown 계열과 special short flint 계열에 가까운 유리 조합으로 부분 분산과 분산상수의 유리지도에서 좌측하단에 위치하여 분산상수가 큰 유리들의 조합으로 초점거리의 변화량은 대략 0.03 mm ~ 0.06 mm 정도로 우수하고 세 파장에서 초점거리가 일치함을 보인다.

특히 1-10 번 의 NFK51A / NZK7 조합은 Table 3과 Fig. 4 에서 알 수 있듯이 fluor crown 계열과 zinc crown 유리로 초

TABLE 3. Design data of the thin achromatic doublets

Number	Surface	Radius	Glass	Vd	nF	Focal shift (mm)
1-6	1	55.93	SFPL53	94.95	1.442	0.06 mm
	2	-28.91				
	3	-29.74	NKZFS4	54	1.5655	
	4	-97.02				
1-7	1	61.87	NPK52A	81.62	1.5012	0.05 mm
	2	-21.68				
	3	-23.16	LAC14	55.47	1.7055	
	4	-76.3				
1-8	1	65.24	SFPL51	84.54	1.5012	0.05 mm
	2	-15.44				
	3	-16.04	BACD5	61.23	1.5958	
	4	-85.12				
1-9	1	73.79	SFPM2	67.73	1.6013	0.06 mm
	2	-15.63				
	3	-16.18	SLAL13	53.2	1.7026	
	4	-103.04				
1-10	1	59.03	NFK51A	84.47	1.4906	0.03 mm
	2	-17.54				
	3	-17.67	NZK7	61.19	1.5142	
	4	-182.19				

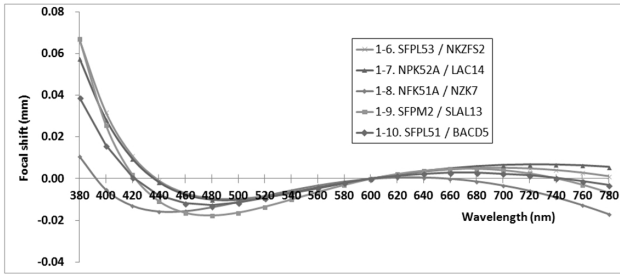


FIG. 4. Focal shift of the thin achromatic doublets.

TABLE 4. Design data of the thick achromatic doublet with best glass combination

	Radius	Thickness	Glass
Object	infinity	Infinity	
stop	26.4634	2.20	NFK51A
2	-16.0876	0.47	
3	-15.3829	2.50	NZK7
4	122.3689	73.3871	
Image	Infinity	0.00	

TABLE 5. RMS Wavefront aberration of the thick achromatic doublet

Wavelength (nm)	0 field	0.7 field	1.0 field
380	0.0220	0.0227	0.0246
400	0.0177	0.0184	0.0205
450	0.0104	0.0113	0.0139
500	0.0061	0.0073	0.0103
550	0.0035	0.0051	0.0083
600	0.0022	0.0041	0.0072
650	0.0020	0.0037	0.0066
700	0.0023	0.0037	0.0063
750	0.0027	0.0038	0.0061
780	0.0030	0.0039	0.0060

점거리의 변화량이 0.03 mm로 일반적인 이중 색지움 렌즈 조합보다 30배 이상 좋은 종색수차의 결과를 보여주었고 이 연구에서 최적의 이중 색지움 렌즈의 유리조합으로 선정하여 두꺼운 렌즈로 변환하였다.

Table 4는 얇은 이중 색지움 렌즈에서 성능이 가장 우수한 NFK51A / NZK7 조합을 두꺼운 렌즈로 변환된 결과이며 Table 5와 같이 파면수차로 성능을 분석하였다. 그 결과 파면수차는 1.0 field에서 0.025 λ로 나타났다.

III. 삼중 색지움 렌즈의 설계

3.1. 얇은 삼중 색지움 렌즈의 수차보정

단위 굴절능 ($\phi_{abc} = 1.0$)을 가지는 얇은 삼중 색지움 렌즈

(apochromatic triplet)에서 굴절률 n , 분산상수를 v , 부분분산을 P , 라 하면 각각의 1, 2, 3번 접합면에 대한 광학유리 소자의 굴절능은 아래의 식들로 주어진다.^[1]

$$v = (n_F - n_d) / (n_F - n_c) \quad (29)$$

$$P = (n_d - 1) / (n_F - n_c) \quad (30)$$

$$X = v_1(P_2 - P_3) + v_2(P_3 - P_1) + v_3(P_1 - P_2) \quad (31)$$

$$\phi_1 = v_1(P_2 - P_3) / X \quad (32)$$

$$\phi_2 = v_2(P_3 - P_1) / X \quad (33)$$

$$\phi_3 = v_3(P_1 - P_2) / X = 1.0 - \phi_1 - \phi_2 \quad (34)$$

이 식들에서 분모 X 는 부분분산과 분산상수의 유리지도에서 세 개의 유리들로 정의되는 삼각형 면적의 두 배와 같고 이 면적이 클수록 소자의 굴절능은 낮아지게 된다.^[1]

3.2. 일반적인 삼중 색지움 렌즈의 유리조합

Figure 5에서는 부분분산과 분산상수의 유리지도에서 일반적인 삼중 색지움 렌즈의 각각의 유리 위치를 삼각형으로 도시하였다.^[7,8] 삼중 색지움 렌즈 역시 이중 색지움 렌즈와 같은 사양으로 $f/8$, $f=100$ mm로 구성하여 초점거리의 변화량을 비교하였다.^[1]

Table 6과 Fig. 6에서 2-1 번의 FPL51 / BALF50 / PBH55 조합은 phosphate crown 계열과 barium light flint 계열과 dense flint 의 조합으로 굴절능의 차이와 삼각형의 면적이 상대적으로 크고 자외선 영역으로 가까워질수록 급격하게 초점거리가 길어지는 경향을 보여준다.

2-2 번의 ULTRAN30 / LAL10 / TPH55의 조합에서 ULTRAN30은 광학적인 특성은 dense phosphate crown과 비슷하고 lanthanum crown과 dense flint 계열로 구성되고 삼각형 면적이 크지 않지만 파장별 초점거리의 변화량은 대략 0.08 mm 정도이며 400 nm 이하의 영역에서 초점거리가 급

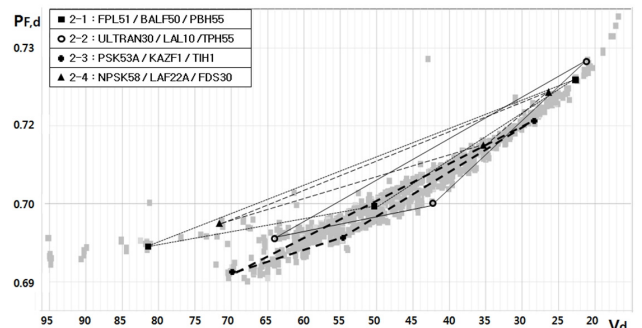


FIG. 5. Location of general thin apochromatic triplet glasses selected in partial dispersion and dispersion glass map.

TABLE 6. General thin apochromatic triplet lenses

Number	Material	Vd	PF,d	Φ	$C = \Phi / (n - 1)$	Focal shift (mm)
2-1	FPL51	81.58	0.6947	3.838244	7.0801953	0.18
	BALF50	51.35	0.6995	-3.210150	-5.539421	
	PBH55	24.04	0.7141	0.371905	0.4174955	
2-2	ULTRAN30	74.21	0.696	4.032875	7.4392203	0.12
	LAL10	50.2	0.6993	-3.334432	-5.7538810	
	TPH55	25.05	0.7142	0.301556	0.3385227	
2-3	PSK53A	63.45	0.6958	4.182072	7.7144358	0.17
	KZFS1	44.32	0.6989	-3.541251	-6.1107671	
	TIH11	25.66	0.7135	0.359178	0.4032083	
2-4	NPSK58	71.18	0.697	3.353865	5.8927082	0.11
	LAF22A	37.18	0.7061	-3.770064	-4.8222887	
	FDS30	26.09	0.714	1.416204	1.804771	

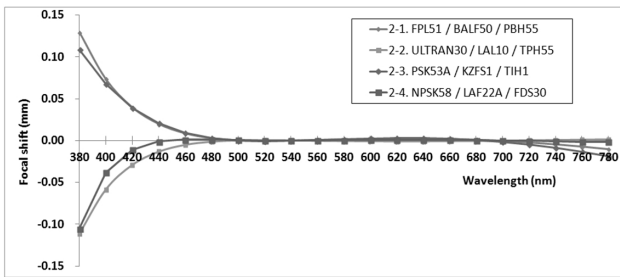


FIG. 6. Focal shift of general thin apochromatic triplet lenses.

격히 짧아지는 경향을 보인다.

2-3번의 PSK53A / KZFS1 / TIH11 조합은 dense phosphate crown 계열과 special short flint 계열, dense flint 계열로 유리도 중앙 부분에서 작은 크기의 삼각형 형태로 굴절능의 차이가 가장 크며 2-1번과 비슷하게 400 nm 이하의 영역에서 초점거리가 급격하게 길어짐을 볼 수 있다.

2-4번의 NPSK58 / LAF22A / FDS30 조합은 dense phosphate crown 계열과 light lanthanum flint 계열과 dense flint 계열의 조합으로 삼각형의 면적은 3번의 조합과 비슷하고 굴절능의 차이는 일반적인 조합에 비해 상대적으로 작으며 2-2번과 마찬가지로 자외선 영역에 가까워질수록 초점거리가 급격하게 짧아진다.

3.3. 최적의 삼중 색지움 렌즈의 유리조합

Figure 7의 조합은 dense phosphate crown의 계열과 lanthanum dense flint 계열, dense flint 계열로 flint 계열의 유리가 두 장 사용되어 400 nm 이하의 영역에서도 초점거리의 변화가 길어지거나 짧아지지 않는 현상을 보여준다.

Figure 8에서 보면 2-5, 2-6, 2-7의 조합은 세 장의 유리를 사용하여 네 파장에서 초점거리가 일치되는 특성을 보인다.[9] 특히 2-6 번의 FK54 / KZFS1 / PBH21 조합의 경우 Fig. 8과 Table 7에서와 같이 종색수차량이 0.015 mm 정도로 가장 작은 것을 확인 하였고 이 조합으로 두꺼운 렌즈로

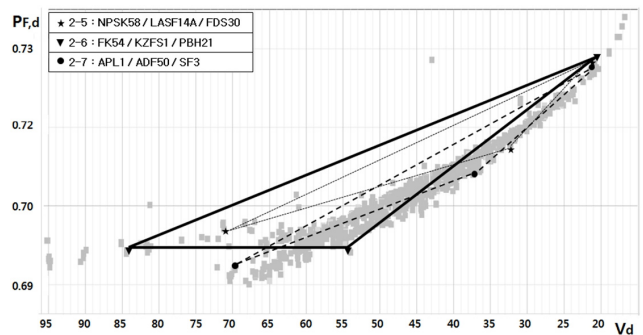


FIG. 7. Location of chromatic aberration correction thin apochromatic triplet lenses selected in partial dispersion and dispersion glass map.

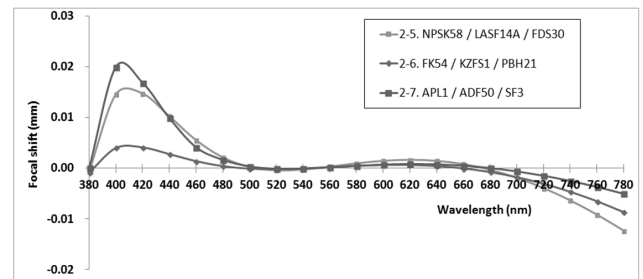


FIG. 8. Focal shift of the designed thin apochromatic triplet lenses.

변환하였다.

2-5, 2-6, 2-7 조합 모두 삼중 색지움 렌즈에서 종색수차를 보정할 수 있는 중요한 요소로는 3종의 광학유리들로 이루어진 삼각형의 면적이 크고^[2] 특히 3종의 유리의 굴절능이 fluor crown 계열에 가까운 유리의 경우 대략 2 ~ 3정도로 너무 크거나 작지 않고 가공이 용이한 곡률 계산되어지는 경우에 종색수차의 변화량이 가장 작게 나타난다.

Table 8은 얇은 삼중 색지움 렌즈의 FK54 / KZFS1 / PBH21 조합으로부터 두꺼운 렌즈로 변환된 결과를 보여준다. 그 결

TABLE 7. Design data of the thin apochromatic triplet

Number	Material	Vd	PF,d	Φ	$C=\Phi/(n-1)$	Focal shift (mm)
2-5	NPSK58	71.18	0.697	3.35386	5.892708	0.020
	LAF22A	37.18	0.7061	-3.770064	-4.822288	
	FDS30	26.09	0.714	1.416204	1.804771	
2-6	FK54	90.66	0.6929	2.3453461	4.3263287	0.015
	KZFS1	44.32	0.6989	-1.522395	-2.627038	
	PBH21	20.87	0.7172	0.1770485	0.1987523	
2-7	APL1	69.53	0.6924	2.1031079	7.5687737	0.025
	ADF50	39.6	0.7024	-2.99302	-8.615935	
	SF3	28.18	0.7112	1.8899126	2.1215903	

TABLE 8. Design data of the thick apochromatic triplet with best glass combination

	Radius	Thickness	Glass
Object	infinity	infinity	
stop	37.852	1.75	FK54
2	-32.137	1.50	
3	-29.444	1.15	KZFS1
4	-171.679	0.75	
5	-27.553	1.15	PBH21
6	-26.743	95.2106	
Image	infinity	0.00	

TABLE 9. RMS Wavefront aberration of the thick apochromatic triplet

Wavelength (nm)	0 field	0.7 field	1.0 field
380	0.0009	0.0020	0.0036
400	0.0013	0.0021	0.0036
450	0.0014	0.0020	0.0033
500	0.0010	0.0016	0.0028
550	0.0006	0.0013	0.0025
600	0.0005	0.0011	0.0021
650	0.0006	0.0011	0.0021
700	0.0007	0.0012	0.0020
750	0.0009	0.0013	0.0020
780	0.0010	0.0013	0.0020

과 이중 색지움 렌즈 조합인 NFK51A / NZK7 조합보다 파면수차가 5배 이상 좋다는 것을 확인할 수 있다.

IV. 1.2 X 텔레센트릭 렌즈의 설계

4.1. 텔레센트릭 렌즈의 유리 조합

Table 10은 최종적으로 설계한 텔레센트릭 렌즈의 사양이며 이는 Schott Moritex 社의 카다로그의 사양과 동일한 것

TABLE 10. Design specification of 1.2X objective telecentric lens

Item	Specification
Optical magnification	1.2X
WD (mm)	70
Wavelength (nm)	380 ~ 780
NAO	0.03
Field of view (mm)	5.33 x 4.0
Depth of field (um)	556
Resolution (um)	10.7
Object side telecentricity (°)	< 0.05°
Distortion (%)	< 0.05

TABLE 11. Design data of 1.2X telecentric lens

	Radius	Thickness	Glass
Object	infinity	70.00	
1	Infinity	3.00	
2	17.51	4.20	FK54
3	-11.87	0.10	
4	-11.95	3.00	KZFS1
5	-27.65	5.28	
6	-12.66	3.00	PBH21
7	-14.07	26.52	
STOP	Infinity	0.10	
9	-6.78	3.00	NFK51A
10	-3.71	3.00	NZK7
11	-8.88	18.45	
12	Infinity	30.3531	
Image	infinity	0.00	

으로 설정하였고 Table 11은 설계 데이터이다. 설계는 앞에서 제시한 이중 색지움 렌즈와 삼중 색지움 렌즈의 유리조합을 이용하여 텔레센트릭 렌즈의 사양에 맞게 최적화하여 구성하였다.



FIG. 9. Optical layout of 1.2X telecentric lens.

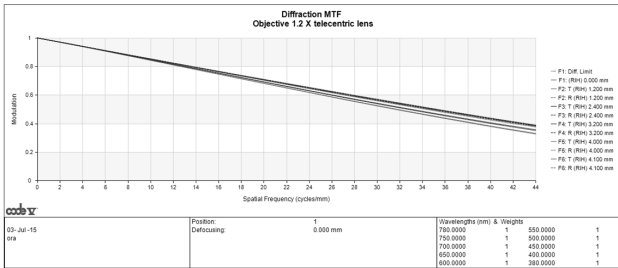


FIG. 10. MTF of the 1.2X telecentric lens.

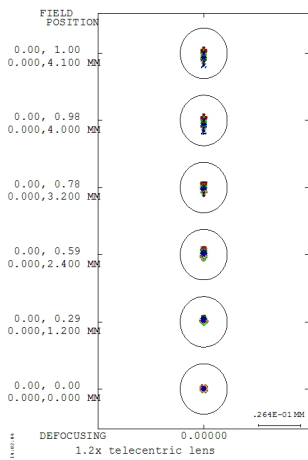


FIG. 11. RMS spot diagram of the 1.2X telecentric lens.

Figure 9에서와 같이 설계된 렌즈는 물체측 텔레센트릭 형태⁶⁾이며 조리개를 중심으로 전반부에 FK54 / KZFS1 / PBH21 조합의 삼중 색지움 렌즈를 배치하고 후반부에 NFK51A / NZK7 조합의 이중 색지움 렌즈로 구성하였고 기본적으로 텔레센트릭 렌즈의 화각이 작고 조리개를 중심으로 대칭적으로 배치하였기 때문에 횡색수차의 영향이 크지 않았다. 렌즈의 생산성을 고려해 보면 주로 Fluor crown 계열의 광학유리는 가격이 비싸고 산성에 상당히 취약하여 가공성이 좋지 않다. 연구에서 사용된 NFK51A의 경우 SR (stain resistance) 이 58 정도로 상당히 높아서 striae 가 발생하기 때문에 외부에는 잘 쓰이지 않기 때문에 광학계의 중심부에 배치를 하였다. 그 외의 재질들은 일반적인 내성의 가공성을 갖는 유리들이다.

4.2. 텔레센트릭 렌즈 성능 분석

이 광학계는 물체측 텔레센트릭 구조이며 물체측 NA 가 0.03으로 MTF는 Fig. 10에서와 같이 45 lp/mm에서 30 % 이상이며 주변광량비 98 % 이상, 왜곡수차는 0.05 % 이하, 물체측 주광선의 각도는 0.05 °이하로 설계되었고 종구면수차

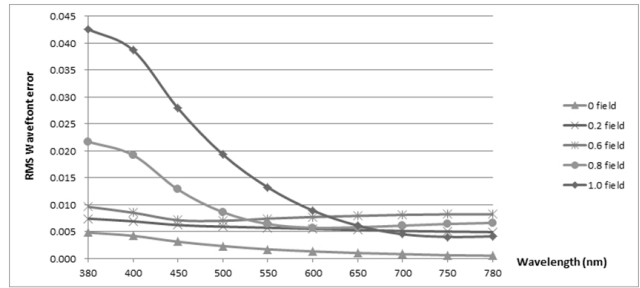


FIG. 12. RMS wavefront error of the 1.2X telecentric lens for whole visible range.

TABLE 12. RMS wavefront error of a conventional 1.2X telecentric lens

Wavelength	0 field	0.2 field	0.6 field	0.8 field	1.0 field
486.1	0.0034	0.0061	0.0113	0.0214	0.0487
587.6	0.0038	0.0077	0.0114	0.0122	0.0181
656.2	0.0038	0.0080	0.0124	0.0131	0.0126
Multi	0.0201	0.0222	0.0248	0.0296	0.0520

TABLE 13. RMS wavefront error of the 1.2X telecentric lens

Wavelength	0 field	0.2 field	0.6 field	0.8 field	1.0 field
486.1	0.0025	0.0060	0.0069	0.0095	0.0214
587.6	0.0014	0.0055	0.0076	0.0057	0.0098
656.2	0.0010	0.0053	0.0080	0.0058	0.0058
Multi	0.0052	0.0149	0.0233	0.0248	0.0255

는 초점심도 300 nm 이하로 보정이 되었으며 Fig. 12는 이 광학계의 RMS 파면수차를 나타낸다.

본 논문에서 설계된 1.2X 텔레센트릭 렌즈는 380 nm ~ 780 nm 까지 수차가 보정되었지만 기존에 시판중인 같은 사양의 텔레센트릭 렌즈와의 비교를 위하여 Table 12와 Table 13과 같이 486.1 nm ~ 656.2 nm의 영역에서만 파면수차를 분석하였고 이 영역에서도 기존의 텔레센트릭 렌즈보다 두 배 이상 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

V. 결 론

이중 색지움 렌즈는 일반적으로 두 파장에서 색수차가 보정된 렌즈를 말하며 이 연구에서는 F/8, f=100 mm로 구성된 이중 색지움 렌즈를 Condry의 G sum 을 이용하여 각각의 곡률 반경을 계산하여 얇은 렌즈로 분석한 결과 부분분산과 분산상수의 유리지도에서 fluor crown 계열과 special short flint 계열의 유리조합 중에서 부분분산의 차이가 작고 분산상수의 차이가 큰 경우 종색수차량이 가장 작아지는 것

을 확인하였고 가시광선 전 대역 (380 nm ~ 780 nm)에서 종색수차를 0.03 mm 까지 설계되었으며 초점심도 내에서 회절한계로 수차를 보정하였다.

삼중색지움 렌즈는 일반적으로 세 파장에서 색수차가 보정된 렌즈를 말하며 이중색지움 렌즈와 같은 사양으로 부분분산과 분상상수의 유리지도를 이용하여 3종의 최적의 렌즈 조합을 연구하여 분석한 결과 3종의 유리조합으로 만들어지는 삼각형의 면적이 크고 fluor crown 계열 유리의 굴절능이 2.0 ~ 3.0 사이이며 가공이 용이한 형상으로 곡률 반경이 계산되어지는 경우에 초점거리의 변화량이 가장 작게 나타나는 것을 확인하였고 그 결과 가시광선 전 대역(380 nm ~ 780 nm)에서 종색수차량 0.015 mm 이내로 설계되었으며 허용가능 초점심도 내에서 회절한계로 수차를 보정하였다.

이중 색지움 렌즈와 삼중 색지움 렌즈를 결합하여 설계된 1.2X 물체측 텔레센트릭 렌즈는 가시광선 전 대역에서 수차가 보정되었으며 MTF 성능을 45 lp/mm에서 30 % 이상이며 주변광량비 98 % 이상, 물체측 주광선의 각도를 0.05 °이내, 왜곡수차 0.05 % 이내로 보정하였고 전체 RMS wavefront error 를 가시광선 전대역 380 nm ~ 780 nm에서 회절한계 이내인 0.057 λ 수준으로 보정하였다.

References

1. W. J. Smith, *Modern Lens Design*, 2nd ed. (Book's Hill Publishing Co., USA, 2007), Chapter 6.
2. R. Kingslake and R. B. Johnson, *Lens Design Fundamentals*, 2nd ed. (Elsevier Co., Washington, USA, 2010), Chapter 5.
3. M. Bass, G. Li, and E. V. Stryland, "Optical properties of Materials," in *Handbook of Optics*, 3rd ed. (McGraw-Hill, New York, USA, 2010), vol. 4, Chapter 2.
4. W. J. Smith, *Modern Optical Engineering* (McGraw-Hill Co., USA, 2008), Chapter 7.
5. SCHOTT Technical Information No. 29, Refractive Index and Dispersion.
6. H. Bai, "Large-format telecentric lens," Proc. SPIE **6667**, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering VIII, 666705 (2007).
7. R. Schuhmann and G. Adams, "Active glass maps for an optical design program," Proc. SPIE **5249**, 3-5 (2003).
8. R. Schuhmann and G. Adams, "Active glass selection and chromatic correction using individual glass maps," Proc. DGaO-Proceedings (2004), Page 1-2 (Glass map).
9. P. Hariharan, "Superachromatic lens combinations," Optics & Laser Technology **31**, 117-118 (1999).
10. R. D. Sigler, "Glass selection for airspaced apochromats using the Buchdahl dispersion equation," Appl. Opt. **25**, 4313-4319 (1986).
11. Y. P. Sang, "A design of high magnification apochromatic beam expander and tolerance analysis," Master's Thesis, Cheongju University, Cheongju, Korea (2014), pp. 31-46.