Correlation of Infrared Optical Lens and Infrared Glass Materials

Choi Ju Hyeon[†]

Korea Photonics Technology Institute, Gwangju, 61007, Republic of Korea

적외선 광학렌즈와 칼코지나이드 기반 광학유리의 상관 관계

최주현[†]

한국광기술원

(Received August 27, 2020; Revised September 10, 2020; Accepted September 11, 2020)

Abstract

Infrared optical glass properties such as refractive index and dispersion value are key factors in designing infrared optical lenses. Until now, infrared optical lenses successfully have been developed using chalcogenide glass materials such as Ge, As, Sb, S, and Se elements. Trends using correlation between dispersion and abbe number was described using standard Abbe diagrams for broad band spectrum. However, it was reported that dramatic changes to Abbe diagram depending on which band is examined. In this report, newly developed chalcogenide optical glass with low or high dispersion was applied to a new diagram. The effect was investigated by selecting two infrared optical materials that can reduce chromatic aberrations when designing an chromatic lens. It was found that chalcogenide glasses tended to suppress chromatic aberrations in comparing with commercial crystal materials, such as ZnSe, ZnS used.

Keywords: *Infrared Optical Glass, Infrared Optical Lens*

[†]Corresponding Author: Ju Hyeon Choi
E-mail: juchoi2@kopti.re.kr

1. 서론

적외선은 전자기파 스펙트럼에서 가시광선과 마이크로파 사이에 있는 광선이며, 온도가 있는 물체, 즉 열을 가진 물체는 그 열을 적외선으로 방출하며 이를 영상화하는 것이 적외선 열영상 카메라이다. 사람의 눈에 보이는 것은 가시광 파장대의 광선뿐이며, 적외선은 전자기파 스펙트럼에서 가시광선과 마이크로파 사이에 있는 광선으로 절대온도(-273.15°C 또는 0K) 이상의 온도를 가지는 모든 물체는 적외선 영역의 광선을 복사한다. 물체의 온도가 높을수록 더 많은 적외선이 방출되는 특성을 가지고 있다. 특히 $8\sim 12\mu\text{m}$ 대역의 복사에너지를 투과하는 광학소재를 적외선 광학소재라 칭하며 결정질의 경우 Ge, ZnSe, ZnS, 등이 있고 대표적으로 비정질 소재는 Ge, As, Sb, S, Se 칼코젠 원소를 포함한 칼코지나이드 유리이다.

적외선 열화상 카메라는 군수용으로 개발되어 중적외선, 원적외선 모든 파장대역을 사용하였고 상대적으로 결정질 기반의 적외선 광학소재를 적용하여 직가공 방식으로 비구면 렌즈를 제작하여 적용하였다.¹⁾

민수에서 보급형 열화상 카메라의 필요성이 대두되었으며 대량생산이 용이하고 저가격에 대량생산이 가능한 칼코지나이드 광학유리소재 및 광학렌즈의 활용성이 크게 관심을 끌었다.²⁾ 몰드성형 칼코지나이드 렌즈를 적용한 열화상 카메라는 가정용에서 산업용에 이르기까지 다양한 범위로 확대되고 있다.³⁾ 특히 저화소급(80×80 , 160×120 , 320×240) 적외선 이미지 센서 보급이 확대되어감에 따라 체온측정용 카메라, 자율주행차용 나이트비전 카메라, 보안감시 카메라, 등 새로운 시장이 형성되고 있다.

400여 조성이 개발된 가시광 광학유리소재와 달리 칼코지나이드 기반 상용 원적외선 광학유리소재는 10여종에 불과하다. 광학소재의 다양성이 부족하다는 것은 광학렌즈 설계 시 광학 특성 및 디자인 요소 도출이 상대적으로 제약이 있다는 의미로 해석될 수 있다. 다양한 조성에 따른 굴절률과 분산 변화에 관한연구 및 몰드성형 전후의 굴절률 변화 연구등이 보고된 바 있다.^{4,5)} 본

연구에서는 칼코지나이드 유리소재의 렌즈 디자인에 필요한 광학적 요소 도출, 저분산 소재와 고분산 소재의 조성 개발의 필요성 및 이를 적용한 광학렌즈 적용성에 대해 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1. 칼코지나이드 광학유리

칼코지나이드 유리소재의 경우 Ge, As, Sb, S, Se 칼코젠 원소를 포함하고 있으며 다양한 첨가물에 의한 특성을 가진 원적외선 투과도를 가지는 유리소재이다. 대부분의 비 광학적 특성은 조정 및 결합 에너지에서 결정할 수 있다. 공유 상관 계수로 살펴보면 Ge(4), As(3), Sb(3), S(2), Se(2)를 가지고 있으며 산화물 유리에서는 존재할 수 없는 결합(예 : Si-Si 또는 O-O)으로 간주될 수 있는 Homo-bonding, Hetero-bonding 등이 칼코지나이드 유리에서는 일반적으로 존재할 수 있다. 상용소재 가운데 가장 많이 사용되고 있는 Ge-Sb-Se (IRG25 = $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$, 유리가 100개의 원자로 구성되었다고 가정할 때 Ge-Se 결합 수 98개, Sb-Se 결합 수 22개, Ge-Sb 결합 수 14개 형성). 구성될 수 있으나 대부분의 비 광학적 특성은 조정 및 결합 에너지에서 결정할 수 있다. 하지만 일반적인 물리적 특성 등은 속성 간의 일반적인 상쇄효과가 있으므로 유리조성 설계 및 렌즈에서의 특성은 매우 다양하다.

현재 상용소재로는 Schott AG, VITRON (독)을 포함하여 8개 해외 선진사기업에서 생산하고 있으며 조성 측면에서는 분산값이 상대적으로 높은 As를 포함한 저분산 조성이 주를 이루고 있다. 하지만 민수시장에서는 As 등이 포함되지 않은 조성을 사용한 적외선 광학렌즈가 필요하므로 Ge-Sb-Se 기반의 상용 조성이 가장 많이 사용되고 있다.

조성 측면에서 일반적인 물성동향을 살펴보면 열적특성의 대표적인 유리전이온도와(T_g)과 열기계적 특성인 열팽창계수(CTE)는 상호 밀접하게 연결되어 있다. 더 강한 화학결합과 더 많은 결합은 높은 T_g 와 경도 및 낮은 CTE를 생성한다. Ge는 가장 높은 결합 수와 가장 강

Table 1. 상용 칼코지나이드 유리소재 대표 조성 및 모델

#	Compositions	AMI	SCHOTT	VITRON	Umicore	RPO	LightPath	IRradiance	ISUZU
1	Ge ₁₀ As ₄₀ Se ₅₀		IRG 24	IG 4				CLASSIC 4	
2	Ge ₂₀ As ₁₃ Se ₆₅				GASIR®2				
3	Ge ₂₂ As ₂₀ Se ₅₈				GASIR®1				
4	Ge ₃₃ As ₁₂ Se ₅₅	AMTIR-1	IRG 22	IG 2		OPTIR-1		CLASSIC 2	
5	As ₂₈ Se ₇₂	AMTIR-4							
6	As ₄₀ Se ₆₀	AMTIR-2	IRG 26	IG 6	GASIR®5		BD-6	CLASSIC 6	
7	As-Se*	AMTIR-7							
8	Ge ₂₈ Sb ₁₂ Se ₆₀	AMTIR-3	IRG 25	IG 5		OPTIR-2	BD-2	CLASSIC 5	
9	As ₃₄ S ₆₆	AMTIR-5							
10	As ₄₀ S ₆₀	AMTIR-6	IRG 27					CLASSIC 1	
11	Ge ₃₀ Sb ₁₃ Se ₃₂ Te ₂₅			IG 3				CLASSIC 3	
12	Ge ₁₂ Sb ₁₃ Sn ₇ Se ₆₈				GASIR®3				
13	Ge ₅ Sb ₃₀ Sn ₅ Se ₆₀								IIR

한 결합 에너지를 가지고 있다 (평균 320 kCal / mol). Sb는 결합 수가 가장 적고 결합이 가장 약하다 (평균 216 kCal / mol). 광학적 특성가운데 대표적인 분산값은 화학 결합의 강도를 통해 금속의 정체성과 연결된다. 높은 결합 강도는 높은 포논 에너지를 나타내며 이것을 통해 높은 IR 분산값을 가지며 분산은 칼코겐 원자의 종류 및 함량과 관련이 있다. 예를 들어 S→Se→Te의 순으로 원소 함량이 증가할 경우 더 낮은 분산을 나타내며 또한 더 낮은 경도, 더 높은 CTE 등의 일반적인 경향을 나타낸다. 하지만 상대적으로는 열적, 기계적 특성은 저하되는 경향이 있다. 온도에 따른 굴절률 변화와 같은 열광학 특성(dn/dT)는 분산 및 CTE에 의해 주요하게 결정된다. 높은 분산의 경우 상대적으로 높은 dn/dT를 나타낸다. 즉 열에 의한 밴드 갭 시프트가 일어나며, 높은 CTE의 조성의 경우 낮은 dn/dT를 나타내므로 이는 열팽창은 온도가 증가함에 따라 밀도를 감소시키기 때문이다. 따라서 낮은 dn/dT 유리는 높은 CTE, 낮은 분산, 낮은 경도의 경향성을 가지게 된다. 반대로 높은 경도는 상대적으로 많은 수의 강한 결합을 필요로 하여 낮은 CTE와 높은 분산의 경향을 가지게 된다.

적외선 광학렌즈를 설계 시 광학소재의 광학인자를 사용하여 디자인 되어진다. 가장 핵심기술로는 광학 수차를 보정하기 위해 다양한 적외선 광학소재가 필요하

다. 광학설계 관점에서 수차가 발생하는 원인을 살펴보면 첫번째로 구면 곡선은 구면 수차를 생성한다. 양의 구면 수차는 다른 렌즈 표면의 음의 구면 수차에 의해 균형을 이룰 수 있으며 Coma, Astigmatism 경우에서도 동일한 효과가 있다. 각 개별렌즈 자유표면에 대해서도 하나의 수차 보정을 가능하게 할 수 있다. 두 번째로 색수차는 더 짧거나 더 긴 파장의 초점을 흐리게 된다. 광학 재료의 경우 굴절률은 분산 함수로 표현할 수 있다. 광학소재를 적용하여 광학렌즈 설계 시 렌즈 파워(ϕ)와 분산(v)의 곱의 합은 0이어야 한다. 즉 다시 말하면 굴절률과 분산이 다른 렌즈의 포지티브 및 네거티브 요소와 더불어 상쇄 효과가 필요하다. 세 번째로 중요한 요소는 열 광학 효과로 인해 온도 변화에 따라 수차가 발생하게 된다. 온도에 따른 굴절률의 변화는 적외선 영역에서 열 효과의 균형을 맞추는 데 사용되는 색채 효과를 수정하는 유사한 기술이지만 굴절률(n) 및 분산값(v) 대신 열팽창계수(CTE) 및 온도에 따른 굴절률의 변화(dn/dT)를 사용한다.

2.2. 고분산, 저분산 칼코지나이드 유리

현재 해외 선진사에서 상용으로 판매되고 있는 칼코지나이드 유리소재와 한국광기술원에서 개발한 칼코지나이드 유리소재의 굴절률과 분산값 분포를 아래 Fig. 1

Fig. 1. Commercial chalcogenide glass and KOPTI chalcogenide glass

에서 나타내었다. Ge-Sb-Se 기반의 분산값 100이상 굴절률 2.55이상 4종을 개발하였으며 Ge-Sb-Se 기반 조성에 S를 첨가함에 따라 분산값의 조절 통한 고분산 조성 9종을 개발하였다.

본 연구에서는 저분산성, 고분산성 두 가지 조성을 준비하였다. 320x240급 34 μ m 열상 카메라에 사용되는 렌즈 직경의 경우 20 mm 내외의 규격을 채용하고 있으며 특히 굴절률 측정을 위한 프리즘 제작을 위해 직경 35 mm 칼코젠유리 잉곳을 제조하였다. 먼저 조성 물비에 따른 원소재를 적량하여 진공실링된 석영관에 장입 후 락킹하면서 1000 $^{\circ}$ C에서 12시간 유지하였다. 1000 $^{\circ}$ C에서 용융된 석영관을 이동하여 270 $^{\circ}$ C로 예열된 전기로에서 3시간동안 서냉공정을 거친 후 상온으로 냉각하였다.

Fig. 2는 최적 조건이라 판단되는 냉각조건으로 제작된 저분산 칼코젠유리의 기본 특성인 투과율 및 굴절률 측정 결과를 나타낸 것이다. 총 13종 개발 소재 가운데 유리안정성과 몰드성형성이 뛰어난 LD10과 HD10 조성에 대하여 2mm 디스크를 제작하였다. 8~12 μ m 평균 투과율은 저분산 LD10 조성의 경우 62.9%, 고분산 조성인 HD10의 경우 58.3%를 나타내었다 (Fig. 2 (a)). 칼코지나이드 유리의 분산값은 $(n_{10\mu m} - 1)/(n_{8\mu m} - n_{12\mu m})$

Fig. 2. (a) Transmittance and (b) refractive index on high(HD10) and low(LD10) dispersion chalcogenide glass

Fig. 3. Correlation between Broadband dispersion (V_{BBIR}) and Partial dispersion (P_{BBIR})

식을 이용하여 산출할 수 있으며, 후보 조성인 LD10과 HD10 유리 샘플의 굴절률을 측정하고 분산값을 산출하였다. 후보 조성인 LD10과 HD10의 굴절률(@10um)은 각각 2.6112, 2.5822를 나타내는 것이 확인되었으며, LD10의 경우 109.28의 분산을 나타내어 저분산 특성을 지니는 유리 시편임을 확인하였다. 반면, Se를 S로 치환한 HD10의 경우 34.52의 분산을 가짐을 확인하여 고분산 특성을 지니는 유리 시편임이 확인되었다.

2.3. 칼코지나이드 적외선광학유리 기반 광학렌즈

1880대에 이르러 Ernst Abbe와 Otto Schott는 유리 소재의 굴절률 분산과 이의 partial 분산 간의 선형관계를 발견하였으며, 서로 다른 partial 분산을 가지는 유리 소재의 조합을 통해 개선된 결상 특성을 얻을 수 있음을 확인하였다. Fig. 3에는 수식 1과 2로 정의 되는 적외선 렌즈용 상용 소재의 전반적인 적외선 파장 대역에서의 굴절률 분산과 이의 partial 분산의 관계를 도시하였다. 본 연구소의 연구 결과를 통해 확보된 렌즈 소재의 분산 및 partial 분산은 상용 소재의 범위에서 크게 벗어나지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 4. Correlation between instantaneous Abbe number and wavelength

$$V_{BBIR} = \frac{n_5 - 1}{n_1 - n_9} \dots \dots \dots \text{식 1}$$

$$P_{BBIR} = \frac{n_1 - n_5}{n_1 - n_9} \dots \dots \dots \text{식 2}$$

하지만, 이들은 실질적으로 적용되는 적외선 파장의 범위에 따라 상이한 굴절률 분산과 partial 분산 결과를 나타내어 결상 특성 개선을 위한 렌즈 소재의 조합에 혼선을 야기한다. 이는 굴절률의 파장에 대한 굴절률 변화가 소재에 따라 다르기 때문에 발생하는 현상으로서, 결상 특성 개선을 위해 서로 다른 분산 특성을 가지는 소재 선정 시 고려되어야 할 분산 특성 도출에 대한 추가적인 개선이 요구되는 사항이다.

따라서, Sellmeier 수식⁶⁾을 (식3) 도입하여 instantaneous 분산을 (식4) 도출함으로써 파장에 따른 분산의 영향을 최소화 한다면, 소재 간의 광학 특성 추세가 보다 명확해지며, 재료에 기초한 광학 설계가 가능해진다는 장점이 있다.

$$n^2 - 1 = \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - C_3} \dots \dots \text{식 3}$$

$$\nu = \frac{dn}{d\lambda} = n^{-1} \sum_i \frac{-B_i C_i \lambda}{(\lambda - C_i)^2} \dots \dots \dots \text{식 4}$$

그러나, 광학 설계 시 소재의 분산값의 차이를 통한 설계와 비교하여 소재 간의 Abbe number 차이를 이용한 설계 보다 유용하다고 알려져 있다. Fig. 4에 상용 광학 소재 및 본 연구소의 연구 결과를 통해 얻어진 유리 소재의 instantaneous Abbe number를 (식5) 계산하였으며, instantaneous Abbe number가 최대값이 되는 파장을 산출하여 이의 비교 결과를 도시하였다.

$$V'(\lambda) = -\frac{1}{2} \frac{n(\lambda) - 1}{\nu(\lambda)}, \quad V = V'(\Delta\lambda) \dots \dots \text{식 5}$$

앞선 Fig. 3과 비교하여 instantaneous Abbe number를 이용하는 경우, 사용 파장에 따른 소재의 선택이 보다 용이함을 알 수 있으며 소재의 구분이 보다 명확해짐을 확인할 수 있다. 또한, 기존 상용 소재가 커버하지 못하는 영역 및 결정을 이용하여 렌즈를 제조해야 하는 영역을 본 연구소의 연구를 통해 제조된 소재를 이용하여 대체 가능함을 확인하였다.

광학설계 관점에서 살펴보면 적용하는 다양한 굴절률과 분산값을 가지는 적외선 광학소재가 필요하다. 특히 가장 제약 요소 중 하나는 파장대역에 상관없이 입

사된 빛의 파장대역에 따라 센서 표면에 맺히는 위치가 다를 경우에 생기는 현상인 수차이다. 원적외선 대역의 카메라에서는 Achromatic Aberration이 영상의 대조비를 저하하는 원인이 된다. Fig. 5에서는 (a) 굴절률 2.6030, 분산값 108.30 (b)굴절률 2.7781, 분산값 160.19를 가지는 서로 다른 상용 소재의 광학적 특성인자를 사용하여 EFL (Effective Focal Length)=50mm 단렌즈에 적용 시 발생하는 색수차를 분석하였다. 분산값과 상관없이 두 저분산 칼코지나이드 소재 모두 상대적으로 왜곡(Distortion)시 색수차는 미미하나 종방향 색수차(Longitudinal spherical aberrations), 비점수차(astigmatic field curve) 등이 모두 발생하는 것이 확인되었다. 이는 단렌즈에서 저분산 특성을 가진 조성의 경우에도 다양한 색수차를 포함하고 있음을 의미한다.

Achromatic Lens는 색수차의 영향을 제거하기 위하여 사용되는 렌즈이다. Achromatic lens는 대개 positive low-index element 및 negative high-index element가 결합된 두 개의 광학 부품으로 구성되며 achromatic 디자인은 또한 구면수차 최소화에도 사용된다. Figure 6.에서는 광학소재의 광학적 특성의 상

Fig. 5. Effect of chromatic aberrations at EFL 50mm using commercial chalcogenide glass with (a) refractive index=2.6030, dispersion=108.30 (b) refractive index=2.7781, dispersion=160.19

Fig. 6. Effect of chromatic aberrations at EFL 50mm using commercial chalcogenide glass with (a) ZnS, ZnSe (b) chalcogenide glass (LD:Low dispersion, HD:high dispersion) from KOPTI

대적 비교를 위하여 동일한 광학설계를 통하여 비교하여야 하나 제안된 모델로서 정성적 설명을 하고자 한다. 먼저 ZnSe, ZnS 결정질 소재 적용한 모델과 KOPTI에서 개발한 칼코지나이드 유리 소재를 적용한 doublet achromatic lens (EFL=50mm)의 색수차 발생 경향을 비교 분석하였다. 그 결과, 모두 종방향 색수차는 단렌즈 대비 개선됨이 확인되었다. 비점수차의 경우 적용 소재와 상관없이 파장별 색수차가 발생하였으나 왜곡시 결정질 소재 적용 시 발생하는 파장별 색수차 대비 칼코지나이드 소재 적용 시에는 상대적으로 매우 안정화 되어있음을 알 수 있다.

3. 결론

칼코지나이드 유리소재의 경우 Ge, As, Sb, S, Se 칼코겐 원소를 포함하고 있으며 다양한 첨가물에 의한 특성을 가진 원적외선 투과도를 가지는 유리소재이다. Ge-Sb-Se 기반의 분산값 100이상 굴절률 2.55이상 4종을 개발하였으며 Ge-Sb-Se 기반 조성에 S를 첨가함에 따라 분산값의 조절 통한 고분산 조성 9종을 개발하였다. 그중 저분산 LD10, 고분산 HD10 소재를 적용하

여 칼코지나이드 유리소재의 적외선 광학렌즈로써 상대적 특성을 평가하기 위하여 색수차에 효과를 조사하였다. 결상 특성 개선을 위해 서로 다른 분산 특성을 가지는 소재 선정시 instantaneous Abbe number가 최대값이 되는 파장을 산출하여 결상광학계에서 색수차 분산에 대한 효과를 비교하기 위하여 doublet achromatic lens 디자인 하였다. ZnSe, ZnS 결정질 소재 및 저분산 고분산 칼코지나이드 소재 광학특성 인자를 적용하여 doublet achromatic lens (EFL=50mm) 색수차 개선 효과를 분석한 결과 칼코지나이드 유리소재가 파장별 색수차 개선 효과가 상대적으로 우수함을 나타내었다.

REFERENCES

1. X. Zhang, "Chalcogenide glass 'molds' thermal imaging" 16552400, Article, *Laser Focus World*, 2002.
2. J. Huddleston, "Chalcogenide Aspherical Lenses in IR Imaging" a64333, Article, *Photonics Spectra*., 2019.
3. M. Friedrichs, "Chalcogenide Glass Molding Advanced Precision in IR Optics" a62080, Article, *Photonics Spectra*., 2017.
4. L. Zhang, W. Zhou, N. J. Naples, and A. Y. Yi, "Investigation of index change in compression molding

- of $\text{As}_{40}\text{Se}_{50}\text{S}_{10}$ chalcogenide glass”, *Appl. Opt.*, 57 [15] 4245-52 (2018).
5. J. H. Lee, J. H. Choi, J. H. Yi, W. H. Lee, E. S. Lee, Y. G. Choi, “Unravelling interrelations between chemical composition and refractive index dispersion of infrared-transmitting chalcogenide glasses” 8 [1] 15482 *Sci. Rep.*, (2018)
6. H. W. Hoffmann, W. W. Jochs, and G. Westenberger, “Use of the Sellmeier dispersion formula for optical glasses and practical implications,” *Proc. SPIE.*, 1780, 303-314 (1992).

●● 최 주 현

- 2004년 University of California Irvine 박사
- 2009년 University of California Irvine 박사 후 연구원
- 2011년 University of California Los Angeles 연구원
- 2012년 한국광기술원 책임연구원