Special
ISSUE 기획특집 5

광학용 적외선 투과성재료와 렌즈설계, 활용에 대해서

글 Tamron 광학개발본부 본부장 / 안도 미노루
번역 유정훈 부장 / (주)그린광학 해외마케팅부

1. 처음

일반적으로 사진촬영과 동영상촬영이라고 하면 가시광선을 사용한 디지털카메라와 비디오를 떠올리지만, 산업용과 감시용으로서 가시광선이외의 이미징기술이 주목도를 더하고 있다.
본고에서는 가시광선보다도 파장이 긴 "원적외선"에 대해서 렌즈설계를 행할 때의 대표적인 재료 소개와 렌즈설계 및 어플리케이션에 대해서 해설하겠다.

2. 원적외선에 대해서

적외선은 태양광을 프리즘에서 분광했을 때에 적색의 외측에 둔 온도계로 온도상승이 보인 것에서 1800년에 영국의 윌리암 허셜(William Herschel)경에 의해 발견된 전자파의 일종이다.
적외선은 그 파장의 길이에 따라 "근적외선", "중(간)적외선", "원적외선"으로 분류되는 것이 많지만, 파장 분류에 대해서는 이용되는 분야 등에 따라 다르다. 예를 들면 ISO20473에서는 표1과 같은 분류로 된다.

표1[1] ISO20473에서의 적외선구분

구분	약칭	대역
근적외선	NIR	0.78~3 ㎛
정적외선	MIR	3~50 ㎛
원적외선	FIR	50~1000 ㎛

2.1 원적외선의 정의

본고에서는 원적외선의 정의로서 파장 8 ㎛~14 ㎛라고 하는 비교적 좁은 영역을 채용한다. 이 영역은 빈(Wien)의 변위 법칙에 의하면 온도 약300 K의 흑체방사의 피크에 있어 소위 "상온"의 물체가 방사하는 열방사가 훨씬 강한 파장영역으로 된다.

이 영역은 분자의 진동준위가 다수위치하고 있어 그 특징이 대기 중에서의 이용을 어렵게 하고 있는 한편 독특한 어플리케이션을 만들고 있다.

2.2 대기의 창

분자의 진동준위 중에는 대기 중에 포함되는 분자도 해당하고 있다. 특히 대기 중에 존재하는 수증기와 이산화탄소에 의한 진동준위가 적외선 파장역에 존재하고 있다.

이 대기 중의 분자는 적외선을 흡수, 방사하기 때문에 이와 같은 준위의 존재하지 않는 일부의 영역만 대기 중에서 촬상 등에 이용할 수 있는 것으로 된다. 그림1에 적외선영역에서의 대기 투과율을 나타낸다. 이 대기 중을 투과할 수 있는 파장역의 것을 "대기의 창"이라고 하고, 본고에서 정의하고 있는 원적외선도 이 대기의 창에 해당한다. 대기의 창은 지상에서의 이용 외, 적외선 천문학과 위성에서의 지상촬영 등에도 이용된다.

3. 원적외선의 어플리케이션

원적외선의 어플리케이션에서 가장 익숙한 것이 서모그래피(thermography)일 것이다. 이것은 방사원의 방사특성에서 물체에 접촉하지 않고 온도를 계측하는 것으로 2차원센서를 사용한 경우는 온도분포의 화상정보가 얻어진다. 이 열을 가시화할 수 있다는 특징을 살린 것이 태양전지와 전자회로진단, 건물진단이다. 태양전지와 전자회로에서는 회로의 단선과 쇼트가 온도변화

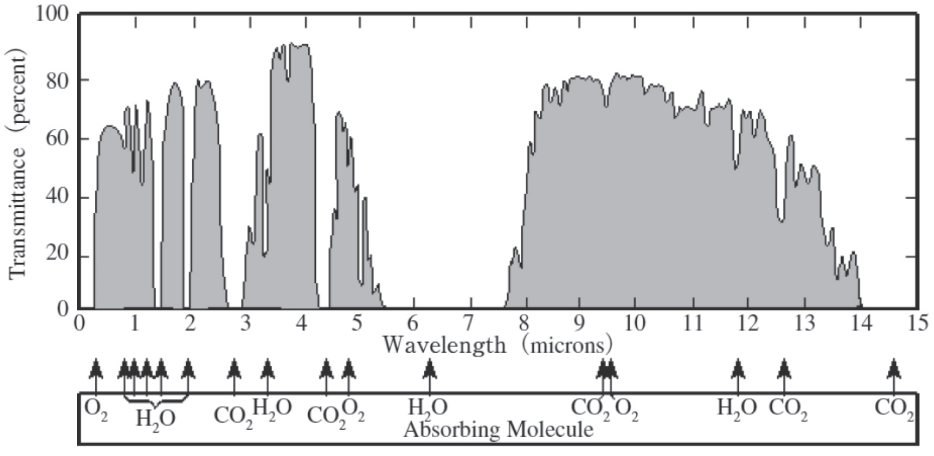

그림1[2] 대기의 투과율

그림2 가스누설검지 모습[6]

해서 나타나기 때문에 원적외선에서의 진단이 가능으로 된다. 건물진단에서는 외벽의 뜸과 건물내부의 배선 이상, 액 샘 등이 표면의 온도변화로서 나타나기 때문에 진단가능하다.

원적외선은 사람 등의 체온을 감지하는 것에도 유용하다. 인체에서의 방사를 촬상하기 위해 광이 미약한 대신에 조명이 필요없는 것과 가시광 조명에 의한 헐레이션(halation) 등의 영향을 받지 않는다는 특징이 있다. 이들 특징을 살리고 있는 것이 서멀 펜스라고 불리는 감시카메라이고, 토지와 건조물로의 침입을 검지하는 어플리케이션이다. 원적외선을 사용하는 것에서 야간에도 인체를 확실히 인식할 수 있다. 또 차재용의 전방감시렌즈로서 사용하는 것에서 헤드램프의 영향을 받기 어려운 인체검지카메라로서 힘을 발휘한다.

분자의 진동준위가 많은 것을 살린 어플리케이션이 가스 검지이다. 가스에 의해 원적외선이 흡수되기 때문에 새고 있는 부분이 어둡게 촬영된다. 이것에 의해 누설개소의 특정 등에 사용할 수 있다.

4. 원적외선용 광학재료의 특징

이와 같이 적외선에는 여러 응용이 생각되지만, 광학계 재료가 일반적으로 가시광선에 사용되는 유리재료와는 크게 다르다. 가시광용 유리의 대부분은 원적외선영역을 투과하지 않기 때문에 렌즈 재료로서는 사용할 수 없다.

원적외선용의 렌즈에 사용되는 재료로서 잘 사용되는 것이 Ge, Si 등의 결정재료, Zn의 화합물, 칼코게나이드 유리 등이 있지만, 각각 비용 및 가공성 등에서 과제를 가지고 있다.

4.1 대표적인 원적외선용 광학재료

표2에 대표적인 원적외선 광학재료를 나타냈다. 표 중의 아베수는 NHG사의 유리 카탈로그에 있는 정의를 채용했다.

이 중에서 광학성능으로서 가장 우수하고 말할 수 있는 것이 Ge이다. Ge는 굴절률이 높고 아베수도 큰 것에서 수차보정의 능력에 우수하고, 색수차 걱정도 적다. 그러나 희귀 금속의 일종이기 때문에 비용이 높고, 또 공급면에서 불안이 있다. 가공에 대해서는 절삭과 연마가공은 할 수 있지만 광학유리와 같은 성형가공은 할 수 없기 때문에 특히 비구면 렌즈로 가공하는 경우 가공비가 높다.

Si는 재료로서는 풍부히 존재해서 가격도 낮지만 생산방법에 의해 9 ㎛에 흡수가 있다. 가공에 대해서는 Ge와 같은 문제를 가지고 있다.

ZnS와 ZnSe는 모두 아연의 화합물이고 CVD쪽 등에 의해 생성된다. 이것들은 가시광의 영역을 일부분 투과시킬 수 있기 때문에 특히 레이저 가공기에서의 광학계에 사용된다. 가시의 레이저를 사용해서 렌즈의 광축확인 등을 할 수 있기 때문이다. ZnS에서는 성형가공도 가능하지만 일반 유리와 비교하면 온도가 높아 가공이 어렵다. ZnSe는 독극물 지정되어 있고, 취급과 폐기에 특히 주의가 필요하다.

KRS-5는 브롬화 탈륨 및 요오드화 탈륨의 혼정에서 탈륨을 포함하기 때문에 독성을 가져, 가공시에는 주의가 필요하다.

4.2 칼코게나이드 유리에 대해서

칼코게나이드 유리는 칼코겐이라고 불리는 제6족 원소의 화합

표2 대표적인 원적외선용 광학재료[3~5]

재료명	Ge	Si	ZnS
굴절률(10.6 ㎛)	4.00	3.42	2.19
아베수	~1000	~1000	19
특징	색수차가 생기기 어렵다	9 ㎛정도에 흡수가 있다	가시도 일부 투과

재료명	ZnSe	KRS-5	칼코게나이드
굴절률(10.6 ㎛)	2.40	2.37	2.4~2.8
아베수	49	~140	35~150
특징	가시도 일부투과	유독 45 ㎛정도까지 투과	유리전이온도가 낮다 성형이 가능

물을 유리화한 것으로 다른 적외선재료와의 큰 차이는 유리전이점의 온도가 낮아 성형가공이 용이한 점이다.

칼코게나이드 유리의 구성은 카탈로그 등에 공개되어 있는 것을 예로 들면 Ge:Se:AS=33:55:12, Ge:Se:Sb=28:60:12, Ge:As=60:40 등 몇 가지의 차이가 있다. 칼코게나이드 유리는 유리 내부에 소위 맥리와 같은 불균일한 부분을 포함하고 있는 것이 있기 때문에 품질에 대해서는 재료메이커와 충분히 협의가 필요하다. 조성을 보아 알 수 있듯이 Se와 As가 들어있기 때문에 가공 때의 분진과 폐기 등에 주의가 필요하다. 성형가공에 의해 비구면 가공을 행하기 쉬운 것, 회절광학소자(Diffractive Optical Element)에 대해서도 성형에서 가공할 수 있는 등 가공면에서는 압도적인 사용하기 쉬움을 가지고, 비용도 Ge와 비교하면 충분히 싸기 때문에 이용이 진행하고 있다.

5. 원적외선용 렌즈의 광학설계

5.1 원적외선용 렌즈 특징

원적외선 렌즈의 첫 번째 특징은 방사한 적외선을 많이 잡는 것이 중요시되고 있다는 것이다. 그 대표적인 사양으로서 F값이 밝고, 주변광량이 풍부한 것을 들 수 있다. 또 렌즈매수를 줄이는 것도 투과율을 높게 하는 것에 연결된다. 렌즈매수의 삭감은 적외선 투과재료의 비용이 일반적인 광학유리와 비교하면 매우 높은 것을 생각하면 비용 삭감에도 크게 기여한다.

또 하나의 특징은 사용하는 광학재료의 종류가 매우 한정된다는 것에 있다. 광학특성이 좋은 Ge와 Si를 사용한 렌즈설계에서는 하나의 재료에서 단색수차와 색수차를 충분히 보정할 수 있는 가능성이 높지만, 칼코게나이드 등 분산이 큰 재료를 사용하는 경우에는 회절광학소자를 채용하는 등 연구가 필요하다.

5.2 회절광학소자(DOE)의 효과와 폐해

DOE는 굴절이 아니라 회절을 이용해서 광의 방향을 컨트롤하는 소자로 CD, DVD, BD라고 하는 픽업과 일부의 SLR(single-lens reflex)용 교환렌즈 등에 사용되고 있다.

DOE는 파장이 길게 될수록 크게 휜다는 특성이 있다. 일반적인 렌즈에서는 파장이 짧게 되면 크게 휘는 성질을 가지기 때문에 DOE를 조합하는 것에서 효율 좋게 색수차를 보정하는 것이 가능하게 된다. 그림3에 굴절과 회절의 광의 휘는 방법을 나타냈다. 여기에서는 편의적으로 파장이 긴 광을 R, 짧은 광을 B로 표현했다.

그러나 DOE에는 설계파장 이외에서는 회절효율이 저하하는 문제가 있다. 설계의도대로 회절하지 않았던 광은 플레어(flare) 등이 되어 회상의 콘트라스트를 저하시킨다. 원적외에서는 이 회절효율 저하에 의한 투과율 저하는 온도계측의 정확성과 감도에 큰 영향을 미치기 때문에 렌즈 내에 채용하는 DOE 수는 최저한으로 하는 것이 좋다.

5.3 원적외선용 렌즈의 구성 예

특허정보에서 특징적인 원적외선용 렌즈의 구성을 소개하겠다. 그림4에 특개2013-145301 실시 예를 나타내는데, 이 렌즈는 초점거리 8.4 mm F/1.0의 렌즈로 2개의 렌즈는 양쪽모두 Ge의 비구면 렌즈를 채용하고 있다. 이 렌즈는 Ge의 광학특성을 살려 2매라고 하는 적은 구성이면서 F/1.0이라는 밝은 광학계를 달성하고 있다. Ge의 경우, 굴절률이 높고, 분산이 적기 때문에 광학

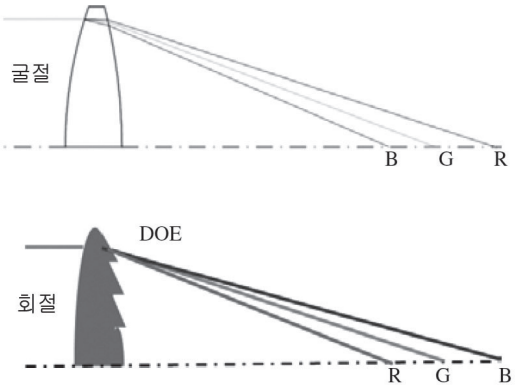

그림3 DOE의 효과

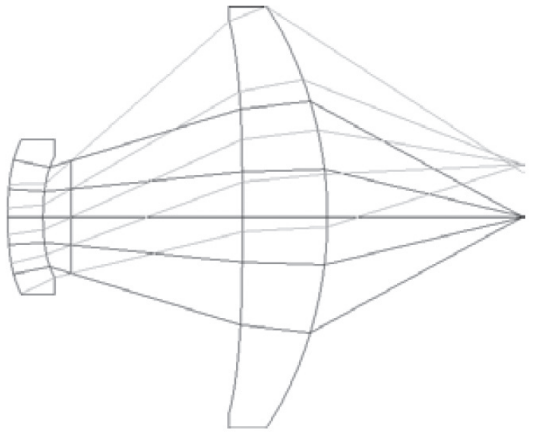

그림4 특개2013-145301 실시 예

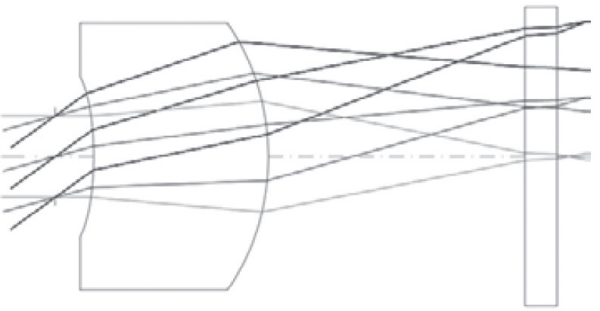

그림5 특개2010-249931 실시 예

소자로서는 매우 사용하기 쉬운 재료이다. 굴절률이 크기 때문에 렌즈형상으로서는 메니스커스형상으로 되는 것이 많다.

칼코게나이드 유리를 사용한 실시 예를 그림5에 나타냈다. 초점거리는 7 mm, F/1.40이고, 1매의 칼코게나이드 유리제 렌즈로 구성되어 있고, 물체면은 비구면에 DOE가 채용되고, 상면측의 면은 비구면으로 되어 있다. DOE는 전술대로 색수차 보정에 사용되고 있다. 해상도 등의 사양에 따라서는 칼코게나이드 렌즈 1매에서도 제품으로서 성립한다. 근년에서는 원적외선 촬영의 보급은 가격을 어떻게 내릴지가 가장 중요하게 되고 있고 비용이 싼

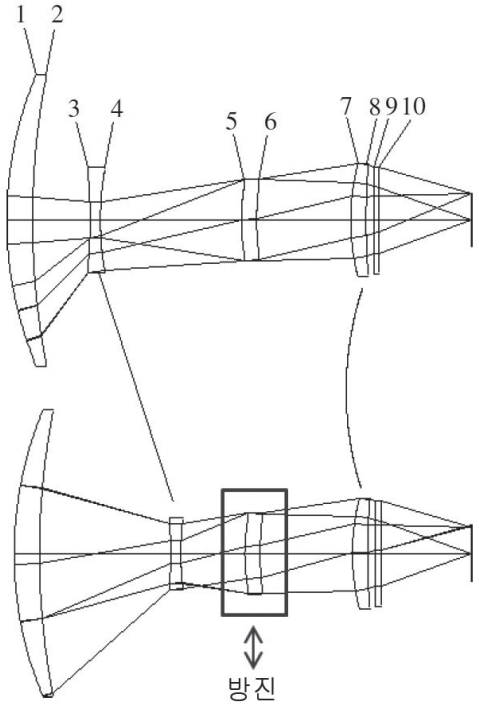

그림6 특허5467896의 실시 예

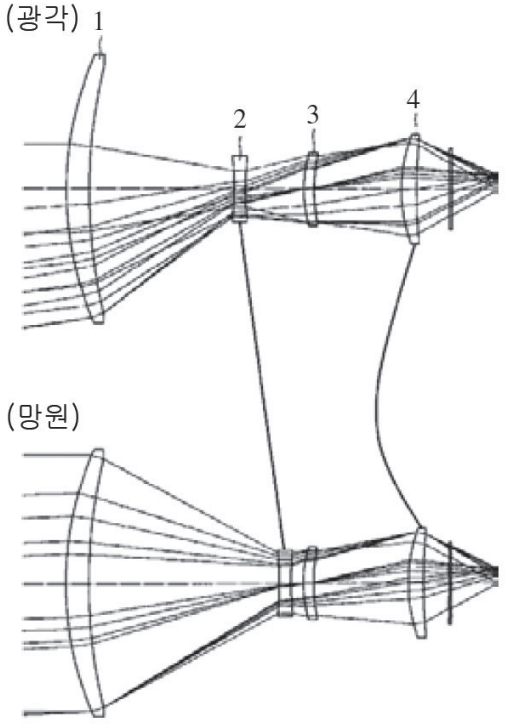

그림7 특개2011-186070의 실시 예

광학설계가 요구되고 있다.

그림6과 그림7은 폐사에서 개발한 원적외선 줌의 광학계이다. 쌍방모두 4군 구성으로 3군에 의해 방진을 행하는 구상으로 되어 있다. 이 렌즈는 전술의 서멀 펜스 등 시큐리티 분야에서의 사용을 상정해서 설계한 것이다. 시큐리티 분야에서는 제품의 신뢰성을 높이는 것이 중요하게 되기 때문에 줌을 행하는 경우에서도 렌즈의 전체길이를 바꾸지 않는 광학계를 채용했다. 가장 물체면에 있는 무거운 제1렌즈군이 고정되어 있기 때문에 렌즈의 구동부분으로의 부담이 적은 외, 방진(防塵) · 방적(防滴)이라고 하는 구조를 채용하기 쉬운 구성으로 되어 있다. 서멀펜스의 경우, 침입자인지 어떤지의 검지율이 중요하게 된다. 침입자검지에 사용되는 동체검지는 카메라자체가 진동을 하고 있는 경우, 화면 내에 있는 것이 움직였다고 오인식 해버리는 것이 있다. 방진을 행하는 것에서 동체검지시스템의 오인식을 줄일 수 있기 때문에 필요할 때에 검지 알람을 울린다는 것이 가능으로 된다.

어느 설계도 2군이 줌, 4군이 포커스 기능을 가지고 있고, 각 군 1매구성의 매우 심플한 줌 구성으로 되어 있다.

그림6의 광학계는 모든 렌즈가 Ge로 구성되어 있지만, 그림7에서는 1매 칼코게나이드 유리를 채용하고 있다. 이것은 Ge와 비교해서 칼코게나이드 유리쪽이 비중이 가볍고 방진에서 구동시키는데 적합한 점, 비용을 감소시킨다는 두 가지 목적이 있다. 비용 감소이라는 점에서는 큰 렌즈에 사용하는 것이 효과적이지만, 특히 제1군에 사용한 경우, 칼코게나이드 유리의 장점인 성형가공을 할 수 없게 되는 점과, 망원측의 색수차 보정이 매우 어렵게 된다는 점에서 채용을 보류했다.

이번 설계 예로서 취급한 렌즈는 F값 1.4이하의 밝은 렌즈이지만, 근년에서는 센서의 감도상승과 비용으로의 요구의 엄격함에서 F값이 지금까지보다 어두운 렌즈도 증가해오고 있다. 그래도 F값 1.6정도로 저하량은 한정되어 있다. 원적외선촬영의 보급의 핵심은 비용에 있다고 말해지지만, 대부분은 센서와 렌즈에 의

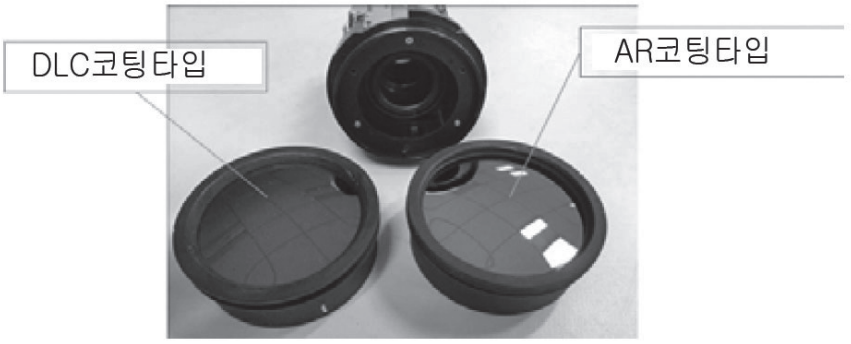

그림8 DLC코팅과 AR코팅의 비교

해 차지되고 있기 때문에 쌍방모두 저비용 실현을 향해 개발이 필요로 되고 있다.

5.4 DLC(Diamond Like Carbon) 코팅

원적외선 렌즈에서 특징적인 것으로서 비바람에 노출될 가능성이 있는 개소로, DLC코팅을 한다는 것이 있다. DLC코팅은 이름에서 알 수 있듯이 매우 단단해서 물리적인 충격에서 렌즈를 보호하는 역할을 한다. 대부분은 렌즈를 수납하는 하우징에 설치되어 있는 Ge의 보호판에 실시되지만, 보호판이 아니라 렌즈에 직접 코팅되는 것도 있다. 반사율은 통상의 AR코팅과 비교하면 높게 되어 버리지만 강도 향상하는 것이 요구되는 경우가 있다. 그림8에 DLC코팅과 AR코팅의 외관비교를 나타냈다. DLC코팅은 흑색이고, AR코팅은 가시광 영역에서는 반사율이 높게 비춰 보인다.

6. 결론

원적외선은 눈에 보이지 않는 열을 가시화할 수 있다는 특징에서 가시광선에는 만들 수 없는 감시와 검사 등의 어플리케이션이 있어 세상의 잠재적인 수요는 높다.

그러나 센서와 렌즈의 비용이 높아 시스템을 도입하는 큰 장벽으로 되어 있다. 렌즈에서는 Ge가 광학특성적으로는 매우 우수하지만, 비용 문제도 있어 다른 재료로의 변경을 모색하고 있는 단계이다. 그 중에서도 칼코게나이드 유리는 가공성의 하기 쉬움과 비용면에서 채용이 진행하고 있다. 현재는 광학성능, 비용, 안전성 등에서 결정권이 있는 원적외선용의 광학용 재료는 눈에 띄지 않는다. 앞으로 어떤 기술혁신을 통해 저렴하고 사용하기 쉬운 광학재료가 나와 주기를 기대하고 있다.

광학설계에서는 F값과 주변광량을 줄이는 것에서 비용이 낮은 광학계를 설계할 수 있지만, 광량이 낮은 것에 의한 잡음에 의해 온도계측 등에 영향을 주기 때문에 사양 판별이 중요하다. 앞으로도 원적외선 렌즈의 보급을 위한 다양한 개발을 하고 싶다.

참고문헌

1)ISO20473
2)Wikipedia 赤外線
3)ZEMAX, CodeV の内部データ
4)NHG 社ガラスカタログ
5)http://www.iiviinfrared.com/
6) FLIR 社 ガス漏れ検知プロフェッショナルガイド