

장파장 적외선 렌즈의 비구면 및 회절면 효과 분석

김현수[†] · 이동한

충남대학교 자연과학대학 물리학과
 ④ 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220

김현규 · 이국환

국방과학연구소 기술연구본부
 ④ 305-600 대전광역시 유성우체국 사서함 35-5호

(2003년 6월 23일 받음, 2003년 7월 24일 수정본 받음)

장파장 적외선 영역에서, 비구면 및 회절면을 동시 또는 단독으로 사용했을 때 렌즈의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 유효초점거리(efl: effective focal length)를 100 mm로 고정하고 반시야 각(half field angle)을 5°에서 30°까지 5° 간격으로 증가시켰을 때 수치구경 값의 변화를 고찰하였다. 렌즈의 광학성능은 장점함수(merit function)를 기준으로 사용하였다. 이 분석을 근거로 픽셀 크기 45 μm, 픽셀 수 320×240 검출기를 기준으로 비냉각 열상장비용으로 사용 가능한 F/1.0인 광학계를 설계하였다.

주제어 : merit function, aspheric and/or diffractive surface, conic surface

I. 서 론

정밀가공기술의 발전으로 광학 렌즈에 비구면을 사용하는 것이 점차 일반화 되고 있으며, 최근 국내에서도 비구면 뿐만 아니라 회절면을 사용한 광학장비 개발에 대한 관심이 급속도로 증가하고 있다.^[1-3] 특히 광학장비의 소형 경량화가 필수적인 경우에 비구면 또는 회절면 렌즈의 사용이 불가피하다고 할 수 있다. 복합면(비구면 및 회절면)을 사용함으로써 영상 시스템에 사용되는 렌즈의 수를 줄여서 소형경량화를 달성하거나, 영상의 질을 개선할 수 있다.^[4] 가시광 영역에서 비구면 및 회절면이 렌즈의 광학성능에 미치는 영향에 대한 분석은 Arizona 대학의 Michael Schaub^[5]에 의해 연구되었다. 본 논문에서는 장파장 적외선(8~12 μm) 영역에서 비구면 및 회절면이 렌즈의 성능에 미치는 영향을 분석하였으며, 비냉각 열상장비용으로 사용 가능한 F/1.0인 광학계를 설계하였다.

II. 이론적 배경

2.1. 비구면 렌즈

비구면렌즈의 효용성은 잘 알려져 있으나, 가공이 까다롭고 구면렌즈에 비해 단가가 높아 보급에 한계가 있었다. 그러나 최근에 플라스틱 렌즈의 출현으로 비구면 렌즈의 대량생산이 가능해짐에 따라 비구면 렌즈를 사용한 소형 경량의 광학장비가 보편화되고 있다.

비구면 해석에 사용되고 있는 원추곡면 방정식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$z = \frac{cs^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2s^2}} + A_4s^4 + A_6s^6 + A_8s^8 + \dots \quad (1)$$

여기서, c 는 곡률반경, κ 는 원추곡면상수, $s = \sqrt{x^2 + y^2}$, A_n 은 비구면 계수이다. $A_n = 0$ 일 때, 위의 방정식은 순수 원추곡면이 되며, $A_n = 0$ 이면 구면, $-1 < \kappa < 0$ 이면 타원면, $\kappa = -1$ 이면 포물면, $\kappa < -1$ 이면 쌍곡면의 형태를 갖는다.

비구면을 사용하는 주된 이유는 수차를 보정하는 것이다. 기본 구면을 비구면화 함으로써 이에 상응하는 수차를 보정할 수 있지만, 근축광선의 특징은 변하지 않는다. 3차 수차만을 고려할 경우 비구면이 Seidel 수차에 기여하는 방정식은 다음과 같다.^[6]

$$S_{I_a} = (n' - n)A_4y^4 \quad (2a)$$

$$S_{II_a} = \frac{y}{y'}S_{I_a} \quad (2b)$$

$$S_{III_a} = \left(\frac{y}{y'}\right)^2 S_{I_a} \quad (2c)$$

$$S_{IV_a} = 0 \quad (2d)$$

$$S_{V_a} = \left(\frac{y}{y'}\right)^3 S_{I_a} \quad (2e)$$

여기서, S_{I_a} , S_{II_a} , S_{III_a} , S_{IV_a} , S_{V_a} 는 비구면에 의한 구면 수차, 코마, 비점수차, 상면만곡, 왜곡수차 기여도, y 는 주변광선의 높이, n 은 렌즈의 굴절률, A_4 는 비구면 방정식의 4차 항의 계수를 각각 나타낸다.

식 (2)에서, 비구면(또는 스톱)의 위치에 따라 수차 기여도가 다르다는 것을 알 수 있다. 즉, 비구면상에 스톱이 있으면 주

[†]E-mail: kimhs@add.re.krr

광선의 높이(\bar{y})가 "0"이 됨으로 비구면은 구면수차만 존재하게 된다. 이 경우 비구면 계수는 구면수차 보정에 필요한 양에 따라 결정된다. 스톱이 비구면에서 멀어지면 다시 구면수차를 유발하게 되며, 또한 코마, 비점수차, 왜곡수차를 유발하게 된다. 따라서 발생하는 이들 각각의 수차는 구면수차 및 적당한 굴절능을 형성하기 위한 주광선과 주변광선의 높이 비에 의존한다는 것을 알 수 있다.

2.2. 회절렌즈

회절렌즈는 Swanson^[7]에 의하여 연구가 본격화 되었으며, Morris^[8,9]에 의하여 이론적인 체계가 수립되었다. 회절렌즈의 가장 큰 특징은 음의 분산특성을 가진다는 것이다. 이는 이중접합 렌즈를 사용하지 않고도 색수차를 보정할 수 있다는 것을 의미한다. 음의 분산특성을 가진다는 것은 회절면에서 단파장 광선보다 장파장 광선이 더 많이 굴절된다는 것을 의미한다. 회절렌즈는 굴절형^[10]과 위상형으로 설명할 수 있다. 굴절형에서는 회절면을 굴절률이 매우 크고 두께가 매우 얇은 렌즈로 회절특성을 설명한다. 굴절형을 사용하여 렌즈의 회절현상을 설명할 수는 있으나, 실제 사용 가능한 렌즈가 아니기 때문에 대부분의 렌즈설계 프로그램 또는 회절렌즈의 회절특성을 설명하는 데에는 위상형을 사용한다. 회절대칭의 회절렌즈에 대한 위상방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(r) = m \frac{2\pi}{\lambda_0} \sum_{n=1} C_n r^{2n} \tag{3}$$

여기서, m 은 회절차수, λ_0 는 설계파장, C_n 은 위상계수, r 은 회절링의 반경이다.

회절면의 색수차 보정 특성에 대해 간략하게 살펴보기로 하자. 물색화(achromatic) 렌즈란 두 파장에 대해 초점이 같다는 것을 의미하며, 낮은 분산을 가지는 양의 렌즈와 높은 분산을 가지는 음의 렌즈를 결합하여 색수차를 보정하였다. 두 개의 얇은 렌즈가 결합되어 있다고 가정하면, 두 유리에 대한 색지움 방정식은 다음과 같다.

$$\phi_1 = \frac{V_1}{V_1 - V_2} \cdot \phi \tag{4a}$$

$$\phi_2 = \frac{V_2}{V_2 - V_1} \cdot \phi \tag{4b}$$

여기서, ϕ 는 색수차 보정 렌즈의 굴절능이며, V_1 과 V_2 는 사용 파장에 대한 유리의 Abbe 상수이며, ϕ_1 과 ϕ_2 는 각 렌즈에서 요구되는 굴절능이다.

Ge와 ZnS를 사용하여 굴절능이 0.01(efl=100 mm)인 색수차 보정 렌즈를 예로 들어 보기로 하자. Ge와 ZnS의 Abbe 상수는 각각 1001.07과 22.91이다. 이 값들을 위의 수식에 대입하면 Ge와 ZnS의 굴절능은 각각 0.01023(efl = 97.71 mm)과 -0.00023(efl = -4269.58 mm)이 된다. 여기서 굴절능의 단위는 1/mm이다.

높은 분산을 가지는 음의 두 번째 렌즈 대신에 회절면을 추가해 보기로 한다[이런 렌즈를 보통 복합렌즈라고 한다]. 즉,

식 (4)의 색지움 방정식에서 높은 분산을 가지는 ZnS의 Abbe 상수를 장파장 영역에서 회절면의 Abbe 상수 -2.5로 대체하면 두 종류의 유리를 사용하는 것과 유사한 색수차 보정 특성을 나타낸다.

식 (4)에 Ge의 Abbe 상수와 장파장 영역에서 회절면의 Abbe 상수 -2.5를 사용하면, Ge와 회절면의 굴절능은 각각 0.009975(efl 100.25 mm)와 0.000025(efl 40,142.91 mm)가 된다. 두 종류의 재질을 사용한 이중렌즈와 회절면을 사용한 복합렌즈의 특성을 비교해 보면, 이중렌즈의 경우에는 분산이 낮은 양의 굴절능과 분산이 높은 음의 굴절능의 렌즈를 사용하는 반면에, 복합렌즈의 경우에는 두 개의 굴절능이 모두 양의 값을 가진다는 것이다. 즉, 이중렌즈의 경우 양의 렌즈는 요구되는 전체 굴절능보다 훨씬 크며, 음의 굴절능은 전체 굴절능에서 이 값을 빼면 된다. 그러나, 복합렌즈의 경우 각각의 굴절능은 전체 굴절능보다 작지만 두 굴절능을 더하면 필요한 굴절능을 얻을 수 있다. 따라서 Ge 유리의 단렌즈에 회절면을 추가함으로써 색수차를 보정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

2.3. 비구면 및 회절면 효과분석

본 논문은 가시광 영역에서 비구면과 회절면의 효과에 대한 Michael Schaub의 연구결과^[5]를 토대로 하여, 장파장 적외선 영역(8~12 μ m)에서 비구면 및 회절면이 렌즈의 성능에 미치는 영향을 고찰하였다.

렌즈의 재질은 적외선 영역에서 흔히 사용되고 있는 Ge를 사용하였다. 광학계는 반시야 각을 5°에서 30°까지 5° 간격으로 6가지의 기본렌즈를 설계하고 최적화하여 수치구경(NA: Numerical Aperture) 값의 변화를 조사하였다. 렌즈설계에 사용된 프로그램은 ORA(Optical Research Associates)사의 Code V를 사용하였다. 구속조건으로는 유효초점거리를 100 mm, 장점함수(MF: Merit Function) 값을 100으로 고정시키고, 기본렌즈에 비구면 및 회절면을 각각 또는 동시에 적용하여 시야에 따른 수치구경 값의 변화를 고찰하였다. 또한 굴절률이 다른 4가지 재질에 대해서도 기본렌즈의 시야변화에 따른 수치구경 값의 변화를 조사하였다.

그림 1은 기본렌즈의 성능곡선을 나타낸 것이다. 6가지 경우에 대한 MF 값은 100으로 비슷한 특성을 가진다고 할 수 있다. 파장에 대한 가중치는 동일하며, 시야에 대한 가중치는

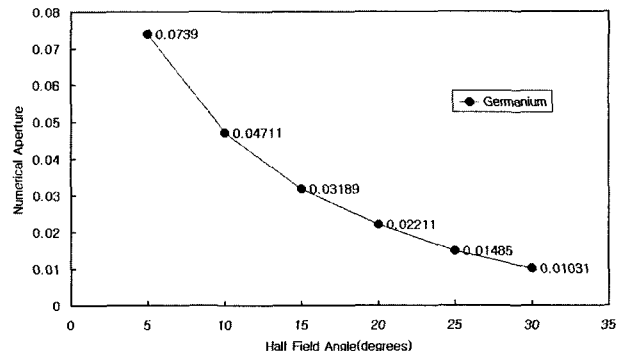


그림 1. 반시야 각(HFOV)에 따른 기본렌즈의 성능곡선.

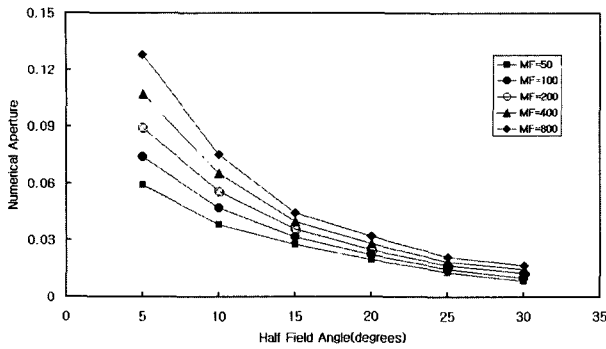


그림 2. MF 값에 따른 기본렌즈의 성능곡선.

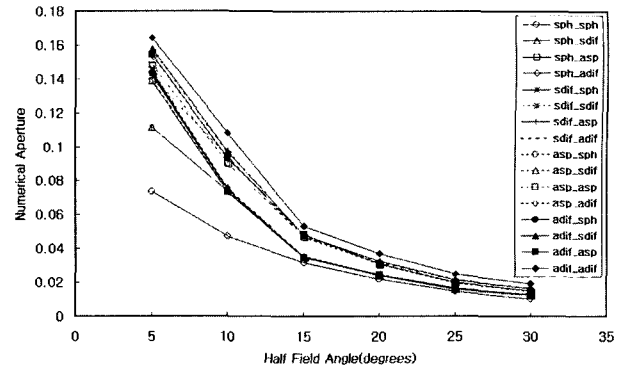


그림 3. 기본렌즈에 비구면 및 회절면을 추가했을 때 반시야 각에 따른 NA 값 변화.

0.0, 0.7, 1.0 시야에 대해 각각 1.0, 0.875, 0.5를 사용하였다. 이는 대부분의 영상 시스템에서 중심에서의 영상이 중요하기 때문에 중심에서의 가중치를 높였으며, 가장자리에서의 영상은 상대적으로 중요성이 떨어지기 때문에 가장자리에서의 가중치를 낮게 설정하였다. 시야가 클수록 NA 값이 수평축에 가까워지므로 성능이 떨어지는 것을 알 수 있다. 작은 시야에서는 구면수차와 색수차에 의해 성능이 제한되며, 시야가 클수록 앞의 두 수차보다는 상면만곡 수차에 의해 성능이 제한됨으로 NA 값의 하락폭이 작아지는 것을 알 수 있다. 비점수차를 어느 정도 발생시키면 상면만곡 수차를 보정할 수 있는데, 이는 조리개를 렌즈로부터 멀어지게 하면 된다.

그림 2는 몇 가지 MF 값에 대해 기본렌즈의 성능변화를 나타낸 것이다. MF 값 변화가 동일하다고 하더라도 시야가 작을수록 성능변화가 큰 것을 알 수 있다. 이는 시야가 클수록 상면만곡 수차가 크기 때문에 나타나는 것으로 시야가 클 경우에는 상면만곡 수차를 보정하는 것이 주요하게 된다는 것을 의미한다.

표 1은 반시야 각이 5도일 때 기본렌즈에 비구면 및 회절면을 추가했을 때 NA 값의 변화를 나타낸 것이다. 세로 줄은 단렌즈의 앞면을 나타내고 가로 줄은 렌즈의 후면을 나타낸다. 비구면과 회절면은 각각 8차 항까지 적용하였으며, 회절차수는 1차이다. 표 1에서 영문이 나타내는 것은 다음과 같다. sph는 구면, asp는 비구면, sdif는 구면에 회절면 추가, adif는 비구면에 회절면을 추가한 것을 의미한다.

기본렌즈에 회절면만을 추가했을 때와 비구면만을 사용했을 때의 성능을 비교하면, 광시야(15도 이상)의 경우에는 성능이 비슷하지만, 작은 시야의 경우에는 비구면만을 사용한 것이 성능이 좋게 나타났다(표 1과 그림 4 참조). 따라서 시야가 작

을 경우에는 비구면을 전후에 추가하는 것이 제작비용 측면에서 좋을 것으로 판단된다.

이것은 참고문헌¹⁵⁾의 결과와는 상반되는 것으로 매우 흥미로운 것이다. 이 결과에 의하면 가시광의 경우에는 색수차가 구면수차보다 우세하기 때문에 비구면을 렌즈에 추가했을 때 성능변화가 크지 않았으나, 회절면을 추가했을 경우에는 성능이 크게 향상되었으며, 또한 비구면과 회절면을 동시에 추가했을 경우에는 성능이 더욱 향상되었다고 보고하였다.

현재 비구면 및 회절면에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 아울러 이들 렌즈제작에 대한 연구도 활발히 진행되고 있으므로 비구면과 회절면을 동시에 추가함으로써 렌즈의 성능을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 무엇보다도 장과장 적외선의 경우 파장이 길고 회절면 제작 또한 가시광보다 용이하기 때문에 비구면을 사용하여 성능을 충족시킬 수 없는 한계조건 또는 작은 시야에서 회절면을 사용함으로써 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

그림 3은 단렌즈에 대해, 표 1과 같이 렌즈의 전후면에 비구면 및 회절면의 조합을 적용했을 때의 성능곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 비구면 및 회절면을 추가함으로써 성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 시야가 작을수록 효과가 크게 나타났다. 이는 시야가 작으면 렌즈의 구경이 커져, 유효초점거리와 장점함수가 일정하므로, 구면수차가 우세하게 나타나기 때문이다. 따라서 비구면 및 회절면을 사용한 렌즈는 NA 값이 크게 요구되는 광학장비에 적합하다고 할 수 있다.

그림 4는 단렌즈의 각면이 동일한 면으로 구성되었을 때의 성능특성을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 시야가 증가함에 따라 시야에 의해 영향을 받는 비축수차에 의해 성능이 결정된다는 것을 알 수 있다. 여기서, 구면의 전후에 회절면을 적용했을 때와 전후 면이 비구면일 때의 성능을 살펴봄으로써 재미있는 현상을 발견할 수 있다. 시야가 클 경우 두 렌즈의 성능은 비슷하지만, 시야가 작을 경우에는 전후 면이 비구면일 때의 성능이 우세하다는 것을 알 수 있다. 이는 구면수차가 시야에 의해 영향을 받는 것이 아니고 렌즈의 구경에 의해 영향을 받기 때문이다.

그림 5는 몇 가지 서로 다른 재질에 대한 NA 값 변화를

표 1. 기본렌즈에 비구면 및 회절면을 추가했을 때의 NA 값 변화 (반시야 각이 5도일 때)

2면 \ 1면	sph	sdif	asp	adif
sph	0.07390	0.11137	0.13859	0.14279
sdif	0.11145	0.14109	0.14193	0.15708
asp	0.13906	0.14469	0.14823	0.15407
adif	0.14378	0.15751	0.15433	0.16397

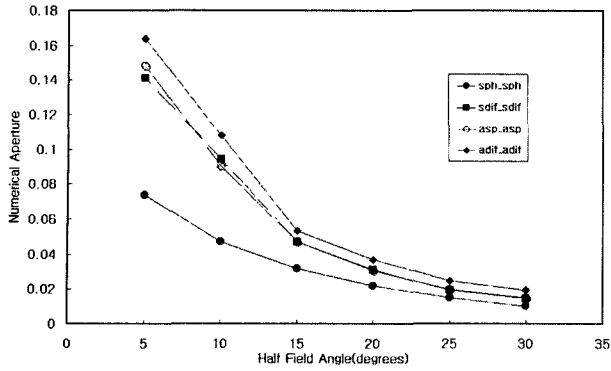


그림 4. 렌즈의 각 면이 동일한 변일 때의 성능 곡선.

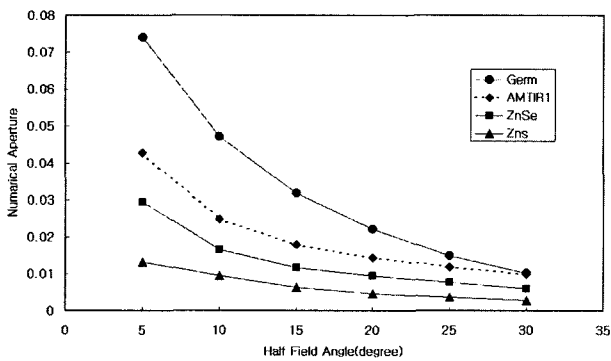


그림 5. 렌즈의 재질에 따른 NA 값 변화.

표 2. 재질 및 파장에 따른 굴절률 값(20°C)

재질 \ 파장(μm)	Ge	AMTIR1	ZnSe	ZnS
8	4.005260	2.501294	2.417306	2.222809
10	4.003073	2.495324	2.406523	2.200164
12	4.002073	2.487759	2.392989	2.170071

나타낸 것이다. 작은 시야에서 렌즈의 재질(굴절률)에 따라 성능이 현격하게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이는 장파장 적외선 영역의 경우 파장이 길어 굴절률에 의한 색수차의 영향이 작은 것으로 판단된다. 굴절률이 작은 재질의 경우, 같은 NA 값을 유지하기 위해서는 렌즈의 구경이 커져야 되는 것을 의미하며, 구경이 커지면 수차 발생이 기하급수적으로 증가하기 때문에 수차보정이 어렵다. 따라서 Ge 재질을 사용하여 렌즈를 설계하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다. 특히 F/1 정도의 비냉각 열상광학계의 렌즈를 설계할 경우에는 굴절률이 큰 재질을 사용하는 것이 좋다는 것을 알 수 있다(표 2 참조).

시야가 커짐에 따라 NA 값 차가 작은 것은 구면수차에 의한 기여도보다는 상면만곡에 의한 수차가 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

III. 두 매 렌즈의 광학성능

이 절에서는 단렌즈에 대한 비구면 및 회절면의 특성을 토대로 하여 두 매의 렌즈를 사용한 광학계에 대한 성능을 고찰

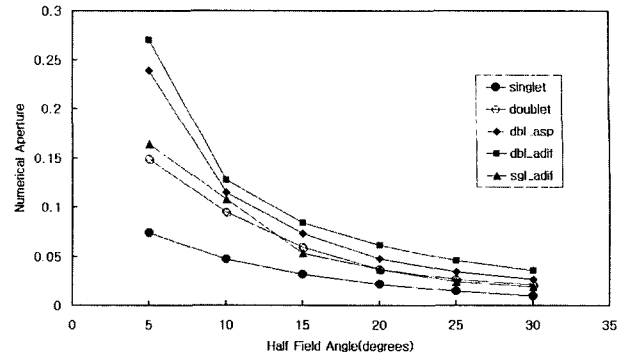


그림 6. 렌즈의 각 면에 비구면 및 비구면과 회절면을 동시에 적용했을 때, 두매의 렌즈로 구성된 광학계의 성능곡선.

하기로 한다. 단렌즈와 같이 렌즈의 각면에 대해 비구면 및 회절면의 특성을 고찰하는 것은 경우의 수가 너무 많을 뿐만 아니라 유사한 특성을 가지는 렌즈들이 많을 것으로 판단되어 단렌즈에서 성능이 가장 우수하게 나타난, 모든 면에 비구면과 회절면을 동시에 적용한 렌즈와 상대적으로 제작이 용이한 비구면만을 적용한 렌즈에 대해 성능을 비교하였다.

그림 6에서 알 수 있듯이 두 매의 렌즈에서도 시야가 커짐에 따라 상면만곡에 의한 수차가 커지기 때문에 비구면 또는 회절면을 추가하여도 성능이 크게 향상되지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 작은 시야의 경우 비구면 또는 회절면을 추가함으로써 렌즈의 성능을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 비구면 및 회절면을 적용한 비냉각 열상광학계 설계

이 절에서는 비구면 및 회절면을 사용한 F-수가 작은 광학계 설계에 대해 검토하기로 한다. 비구면 및 회절렌즈의 특징 중의 하나는 NA 값을 크게 할 수 있다는 것에 착안하여 비냉각 열상장비에 적용하기 위한 F/1.0의 광학계 설계를 목표로 하여 성능변수를 결정하였다. 선택한 검출기의 픽셀 수는 가로 세로가 각각 320×240(76,800)이며, 픽셀 크기는 45 μm의 정사각형으로 fill factor는 무시하였다. 검출기의 크기는 가로 14.4 mm, 세로 10.8 mm, 대각선 18 mm이며, 검출기 덮개 유리의 두께와 덮개 유리에서 픽셀 면까지의 거리를 각각 1 mm로 설정하였다.

영상센서가 선정되면 시스템 변수에 의해 광학적 요구조건이 결정되며, 검출기의 크기와 시야에 의해 렌즈의 초점거리를 계산할 수 있다. 고성능의 광학계를 설계하기 위하여 반사야 각을 3°로 하였으며, 이 때 초점거리는 171.7 mm이다.

영상장비에서는 왜곡수차가 커지면 영상이 왜곡되어 영상장비로써의 가치가 떨어지므로 왜곡수차를 최대 2% 이하로 하였다.

분해능 요구조건은 검출기와 관련된 에일리어싱 및 소프트웨어 보정과 같은 몇 가지 다른 요인들뿐만 아니라 픽셀 간격에 의해 결정된다. 최대 분해능 요구조건으로 Nyquist 주파수에서 MTF를 50% 이상으로 설정하였으며, 본 연구에서 사용한 검출기의 픽셀 간격이 45 μm이므로 Nyquist 주파수는

11.1 cycles/mm이다.

렌즈의 성능은 광학적 요구조건뿐만 아니라 카메라의 기계적인 설계조건에 의해서도 영향을 받는다. 예를 들면 유효초점거리, 후초점거리, 렌즈경통의 직경, 대물렌즈 크기 등의 제약조건을 따른다. 추가되는 기계적인 구속조건은 각 렌즈의 크기에도 영향을 미치며, 초점거리는 렌즈가 작아지는 경향을 고려하여 선택하였다. 이것은 렌즈를 취급하거나 제작하는 것을 어렵게 만들며, 중앙 및 가장자리 두께는 허용하는 한 최소(또는 최대) 값을 가지게 설계하였다. 허용되는 렌즈의 두께는 확실히 렌즈를 제작하고 조립하는 데 영향을 준다. 검출기에 대한 렌즈의 허용공차 및 필요할 경우 필터를 삽입할 수 있게 하기 위하여 후초점거리를 최소 3 mm로 하였다.

검출기 전체에 걸쳐 적절한 성능을 보장하기 위하여 시야를 47개로 세분하였다. 시야에 따른 가중치는 시야 0.7°까지는 2차 함수로 감소시켜 0.875가 되게 하였으며, 그 이후는 선형적으로 감소시켜 0.5가 되게 하였다. 사용 파장은 8 μm, 10 μm, 12 μm로 가중치를 동일하게 적용하였다.

먼저 단렌즈의 양면에 비구면에 회절면을 동시에 추가했을 때 비냉각 열상장비용 영상렌즈로 사용가능한지 검토하였다. 이 경우 F/3.0에서 회절한계 성능을 나타내었으며, 분해능은 MTF가 50%일 때 4.4 cycles/mm이었다. 따라서 단렌즈를 사용하여 비냉각 열상장비의 광학계를 설계하는 것은 거의 불가능하다고 할 수 있다.

다음은 두 개의 렌즈를 사용하여 렌즈의 각면이 구면, 비구면일 때와 첫째 렌즈의 후면에 비구면과 회절면을 동시에 적용하고 나머지 면은 비구면을 사용했을 때, 비냉각 열상장비용 광학계(F/1.0)로써 사용가능한지 알아보았다. 렌즈의 각면이 구면일 때, F/5.8에서 회절한계 성능이 나타났으며, MTF가 50%일 때 5.8 cycles/mm이었다. 각면이 비구면일 때의 회절한계 성능은 F/1.7이었으며, 위에서 설정한 광학계의 요구조건을 모두 만족하였다. 이 경우 렌즈 자체의 성능조건은 만족한다고 할 수 있으나, 비냉각 열상 검출기의 감도가 낮기 때문에 충분한 광량이 도달하지 못하여 영상이 흐리게 나타나므로 영상장비의 기능을 발휘할 수 없다. 따라서 렌즈의 각면을 비구면으로 했을 경우 비냉각 열상 장비의 렌즈로는 부적합하다고 할 수 있다. 마지막으로, 첫째 렌즈의 후면에 비구면과 회절면을 동시에 적용하고 나머지 면에 대해서는 비구면을 적용했을 경우에는 비냉각 열상장비의 요구조건인 F/1.0을 만족하였으며, 이 때 최대 반시야 각(3°)에서의 분해능은 MTF가 50%일 때 28 cycles/mm로 성능조건을 훨씬 상회하였다. 따라서 비구면에 회절면을 적용하여 두 개의 렌즈로도 비냉각 열상 장비의 렌즈로 사용할 수 있을 것으로 판단되며, 현재까지는 통상 3개의 렌즈를 사용하여 비냉각 열상장비 광학계를 설계하였다.

그림 7에서 11까지는 첫째 렌즈의 후면에 비구면과 회절면을 동시에 적용하고 나머지 면에는 비구면을 사용한 F/1.0의 이군렌즈의 광 계통도, 유한광선수차, 횡광선수차, spot diagram, MTF 곡선을 각각 나타낸 것이다. 표 3은 F/1.0 렌즈의 비구면계수 및 회절계수를 나타낸 것이며, 표 4는 두 매로 구성된 F/1.0 광학계의 최적 설계값을 나타낸 것이다.

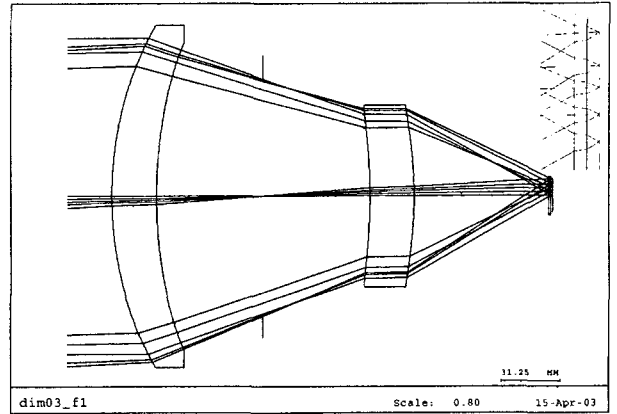


그림 7. F/1.0 광학계의 광 계통도.

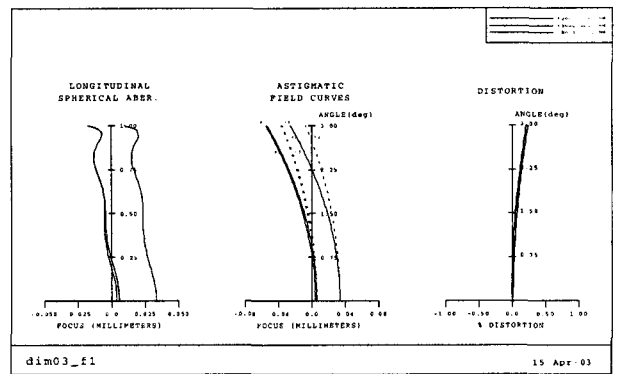


그림 8. F/1.0 광학계의 유한광선수차.

표 3. F/1.0 광학계의 반지름과 비구면 및 회절 계수

Surface No.	#1	#2	#4	#5
Radius	203.459	261.963	-261.963	-203.459
A ₄	1.93500E-08	3.42753E-08	1.63098E-07	1.77854E-07
A ₆	5.45548E-13	8.82953E-13	-4.75662E-13	-3.01168E-12
A ₈	5.50563E-17	9.78785E-17	1.46988E-15	1.78647E-15
C ₁		-7.69191E-06		
C ₂		-1.65794E-10		
C ₃		2.65205E-14		
C ₄		-2.08166E-18		

표 4. 두 매로 구성된 F/1.0 광학계의 최적 설계값

Surface Number	Surface Type	Radius	Thickness	Glass	Effective Aperture
Objective	Sphere	Infinity	Infinity	Air	
1	Asphere	203.459	24.358	Germanium	179.733
2	Diffraction	261.963	54.981	Air	164.703
Stop	Sphere	Infinity	54.981	Air	128.311
4	Asphere	-261.963	24.358	Germanium	96.802
5	Sphere	-203.459	73.721	Air	97.398
6	Sphere	Infinity	1.000	Germanium	19.159
7	Sphere	Infinity	1.000	Air	18.935
Image	Sphere	Infinity	0.000	-	18.062

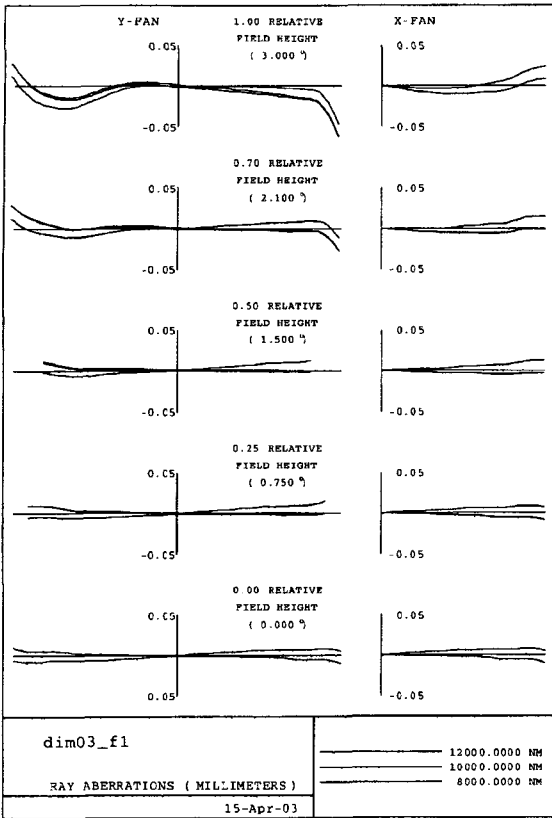


그림 9. F/1.0 광학계의 회광선수차.

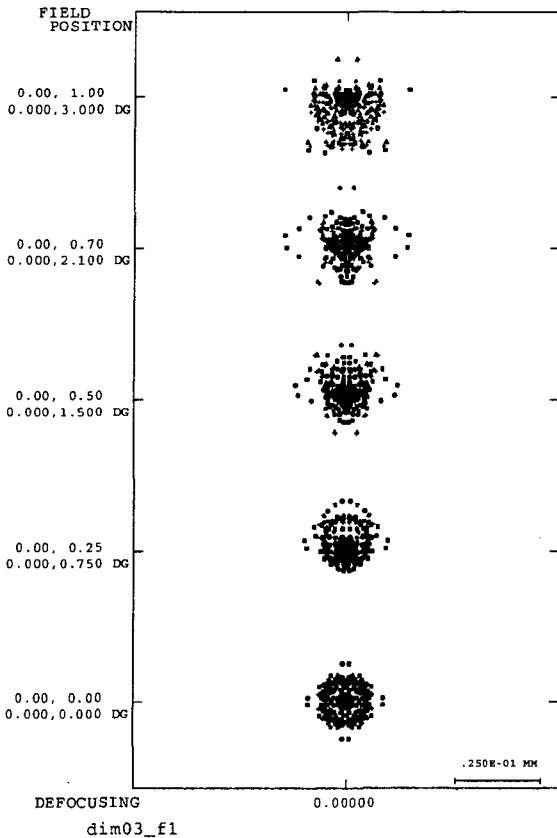


그림 10. F/1.0 광학계의 Spot Diagram.

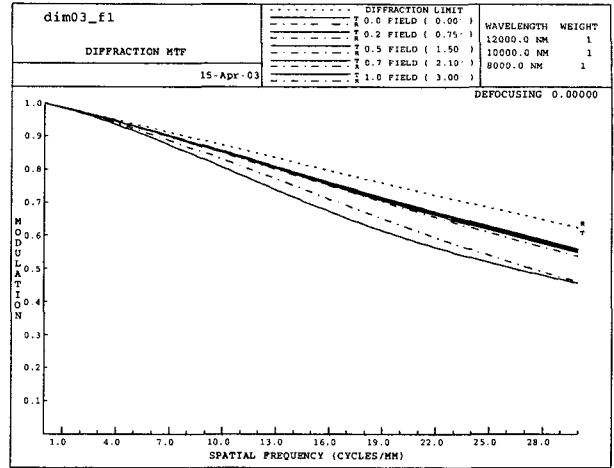


그림 11. F/1.0 광학계의 MTF Curves.

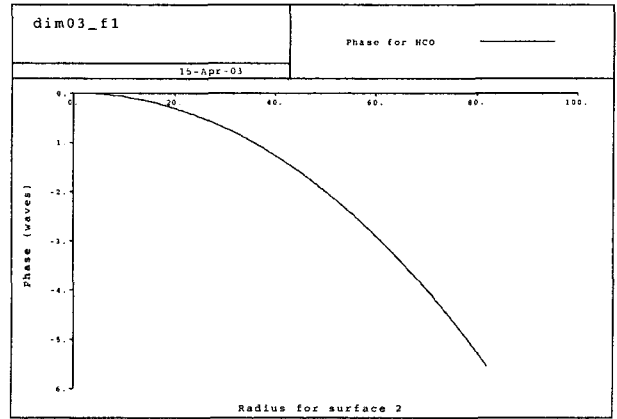


그림 12. F/1.0 광학계 회절면의 반지름에 따른 위상차 곡선.

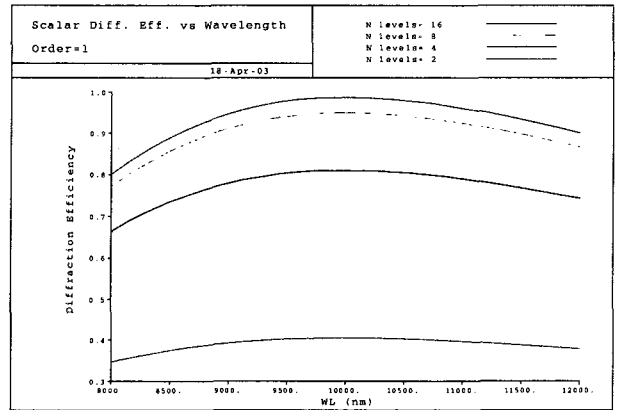


그림 13. F/1.0 광학계 회절면의 파장에 따른 회절효율.

V. 두 개의 렌즈를 사용한 F/1.0 광학계의 회절특성 분석

이 절에서는 F/1.0 광학계의 회절특성을 고찰하기로 한다. 식 (3)에서 1차 회절차수에 대한 회절방정식은 $\phi = (2\pi/\lambda_0)\sum C_n r^{2n}$ 이 되며, 회절면의 물리적인 깊이(d)는 $\lambda_0/(n_0 - 1)$ 이

표 5. F/1.0 광학계의 회절면의 회절 링의 반지름 및 간격

Position of Ring	1st	2nd	3rd	4th	5th	Last (5.6)
Radius of Ring (mm)	35.660	50.082	61.050	70.213	78.138	82.352
Spacing of Ring (mm)	35.660	14.423	10.968	9.162	7.926	4.214

Total No. of Ring : 5.6

다. 여기서 n_0 는 설계파장 λ_0 에서 렌즈의 굴절률이다. 회절 링의 개수(N)는 $(1/\lambda_0) \Sigma C_n r_{max}^{2n}$ 로 주어지며, F/1.0 광학계의 회절면의 회절링의 개수는 5.6개 이며, 링사이의 최소 간격은 7.9 mm이었다(표 5 참조).

Kinoform의 회절효율은 식 (5)와 같이 주어지며, 이 경우 회절효율은 설계파장(10 μm)에서는 100%이고 사용파장대역의 가장자리인 8 μm 와 12 μm 에서는 각각 81.1%와 91.2% 이다.

$$\epsilon = \frac{\sin \pi \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right)^2}{\pi \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right)}$$

그림 12는 F/1.0 광학계의 회절면에 대해 반지름에 따른 위상차를 나타낸 것이며, 그림 13은 파장에 따른 회절효율을 나타낸 것이다. 설계파장에서 렌즈면 전체에 걸친 회절효율은 98.7%로 일정하였으며, 사용파장대역(8~12 μm)에서의 평균회절효율은 93.1%로 대역파장 전체에 걸쳐 요구되는 영상렌즈의 평균회절효율(90%)을 만족하였다.^[11] 따라서 본 연구에서 설계한 F/1.0 광학계는 위에서 요구하는 모든 조건을 만족하였으므로 장파장 적외선 영역에서 비냉각 열상장비의 광학계로 사용가능할 것으로 판단된다.

VI. 결 론

장파장 적외선 영역(8~12 μm)에서 한 매 및 두 매로 구성된 광학계에 대해 비구면 및 회절면의 효과를 분석하였다. 유효초점거리를 100 mm로 고정하고, 반시야 각을 5°에서 30°까지 5° 간격으로 6가지의 기본렌즈를 설계하여 장점함수 값이 100이 될 때까지 최적화한 후, 시야에 따른 수차구경 값의 변화를 조사하였다. 한 매의 렌즈에 대해서는 스톱을 렌즈의 후면에 두어 최적화 하였으며,^[2] 두 매의 렌즈에 대해서는 렌즈의 중앙에 두어 대칭형으로 설계하였다.

시야가 작을수록 비구면 및 회절면을 적용함으로써 성능이 크게 향상되었다. 이는 시야가 작을 경우 렌즈의 구경이 커지고 두께가 얇아져 구면수차 및 색수차에 의한 영향이 크게 나타나기 때문이다. 시야가 클 경우에는 시야의 영향을 받는 비축수차가 커지기 때문에 시야에 따른 NA 값 변화가 작았으며, 또한 비구면 및 회절면의 효과도 작은 시야와 비교할 때 크지 않았다. 따라서 작은 시야에 대해 비구면 또는 회절면을 사용하면 렌즈의 성능을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

픽셀 크기 45 μm , 픽셀 수 320×240의 검출기에 대해 한 매 및 두 매로 구성된 광학계에 비구면 및 회절면을 조합하여 적용했을 때, 비냉각 열상장비의 광학계에서 요구하는 F/1.0의

광학계로 사용가능함을 분석하였다. 한 매 및 모든 면이 비구면인 두 매의 렌즈로 구성된 광학계의 경우 비냉각 열상장비의 광학계로는 부적합한 것으로 나타났다. 그러나 첫째 렌즈의 후면에 비구면과 회절면을 동시에 적용하고 나머지 면에는 비구면을 추가한 두 매의 렌즈를 사용한 광학계의 경우에는 F/1.0의 조건을 만족하였다. 이 때의 분해능은 MTF가 50%일 때 28 cycles/mm로써 성능요구조건인 Nyquist 주파수인 11.1 cycles/mm를 훨씬 초과하여 비냉각 열상장비의 광학계로 사용가능할 것으로 판단되며, 회절면의 회절링의 개수는 5.6개이며, 최소 링간격은 7.9 mm 이었다.

이상에서 고찰한 결과, 장파장 적외선 영역에서 비구면 또는 회절면을 사용함으로써 렌즈사용 매수를 줄이거나 성능을 향상시킬 수 있으므로 광학장비의 소형 경량화에 크게 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 김현숙, 김창우, 홍석민, “3.7-4.8 μm 파장대역 FLIR 시스템을 위한 20:1 줌 렌즈 광학계 설계 및 제작,” 한국광학회지 제 10권 6호, pp. 462-467, 1999.
- [2] 이환선, 임천석, 조재홍, 장수, 김현규, “초소형 영상 전송 모듈용 DOE(Diffractive optical element) 렌즈의 설계 및 평가,” 한국광학회지 제 12권 3호, pp. 240-249, 2001.
- [3] 박성찬, “회절광학소자를 이용한 Head Mounted Display용 광학계 설계,” 한국광학회지 제 12권 6호, pp. 512-517, 2001.
- [4] J. Kudo, H. Wada, T. Okamura, M. Kobayashi, K. Tanikawa, “Diffractive lens in 8- to 10- μm forward-looking infrared system,” *Opt. Eng.* vol. 41, no. 8, pp. 1787-1791, 2002.
- [5] M. P. Schaub, “Aspheric Diffractive Surfaces in One, Two and Three Element Lenses,” Ph. D. Dissertation, the University of Arizona, Jul., 1999.
- [6] R. R. Shannon, *The Art and Science of Optical Design*, (Cambridge Univ. Press, New York, 1999) pp. 553-566.
- [7] G. J. Swanson, “Binary Optics Technology : The Theory and Design of Multi-level Diffractive Optical Elements,” Technical Report 854, Lincoln Laboratory, 1989.
- [8] D. Faklis and G. Michael Morris, “Achromatic Imaging with Combinations of Holographic and Conventional Lenses,” *J. Opt. Soc. Am.* 3, pp. 53-57, 1980.
- [9] D. A. Buralli, G. M. Morris, and J. R. Rogers, “Optical performance of holographic Kinoforms,” *Appl. Opt.* vol. 28, no. 5, pp. 976-983, 1989.
- [10] W. C. Sweatt, “Describing holographic optical elements as lenses,” *J. Opt. Soc. Am.* vol. 67, pp. 803-808, 1977.
- [11] Y. G. Hong, S. I. Kim, W. G. Yeo, and C. K. Lee, “Telephotolens Design With Refractive/Diffractive Hybrid Lens,” *J. Opt. Soc. Kor.*, vol. 1, no. 2, pp. 74-80, 1997.

Analysis of aspheric and diffractive surface effect for long wavelength infrared lens

Hyeon Soo Kim[†] and Dong Han Lee

Department of Physics, Chungnam National University, Daejeon 305-764, KOREA

[†]*Email: kimhs@add.re.kr*

Hyun Kyu Kim and Guk Whan Lee

Agency for Defense Development, Yongsung P.O. Box 35-4, Daejeon 305-600, KOREA

(Received June 23, 2003, Revised manuscript July 24, 2003)

We analyzed the aspheric and/or diffractive surface effects to the performance in the long wavelength infrared (8~12 μm). Also we investigated the dependence of the NA values for the fixed effective focal length 100 mm when the field angle was varied from 5 degrees to 30 degrees stepped by 5 degrees. We chose the merit function as a criteria to compare the performance of the different lenses. Based on the analysis of the aspheric and/or diffractive surface effects, we designed the optical system of F/1.0 for the uncooled thermal imaging system. As for detector the pixel size was 45 μm square and the number of pixels were a 320 \times 240 pixels.

OCIS Code : 080.3620.