

타원면경 측정 Null 렌즈 설계

김연수 · 김병운*

국방과학연구소, *한국과학기술원 물리학과

이윤우

한국표준과학연구원

(2000년 5월 2일 받음, 2000년 6월 21일 수정본 받음)

고해상도 원격관측용 카메라로 설계된 비축 3반사 광학계의 제3거울인 타원면(원추계수 >0) 형상측정 Null 렌즈를 설계하였다. Null 렌즈 설계방식으로는 측정감도가 2배로 높으면서 작은 기준 평면경을 사용하는 혼합방식을 제안하였다. 혼합방식과 autostigmatic 방식으로 설계한 Null 렌즈의 광파면 왜곡 민감도를 비교하여 혼합방식이 보다 유리한 Null 측정 광학계임을 제시하였다.

OCIS codes : 120.6650, 220.2740.

I. 서 론

비구면이 우주 망원경등의 대다수 고해상도 카메라에 사용되면서 높은 광학성능을 갖는 비구면 거울의 수요가 증가하고 있다. 그러나 비구면은 형상측정이 까다로와 거울을 정밀하게 제작하기가 쉽지 않다. 비구면 형상은 다양한 방법으로 측정할 수 있다. 기계적 또는 광학적 탐침을 이용하여 직접 측정할 수 있고, 또는 기하광선이나 간섭계를 이용하여 간접적으로 형상을 그려낼 수 있다. 비구면이 원추곡면일 경우, 비구면은 특정 물점 및 상점의 쌍에 대하여 이상적인 점상(spot image)을 만드므로 이와같은 stigmatic 점들을 이용하여 비구면의 형상을 측정할 수 있다.^[1] 그러나 타원면(원추계수 >0)과 같이 stigmatic 점이 광축에 있지 않은 경우 비구면 측정은 간단하지 않으므로 Null 렌즈를 이용한 측정이 보통 이용되고 있다. Null 렌즈 설계방식으로는 크게 그림 1과 같은 autostigmatic 방식^[2-4]과 그림 2와 같은 자동시준 방식으로 나눌 수 있다. 자동시준 방식은 autostigmatic 방식에 비해 측정감도는 2배 이나 기준 평면경이 시험 비구면보다 커야 하는 단점을 가진다. 이에 반해 autostigmatic 방식은 자동시준 방식에 비해 측정감도는 떨어지나 소형 렌즈만으로 구성할 수 있는 장점을 지녀 비구면 측정 Null 렌즈 설계방식으로 주로 이용된다. Null 렌즈 설계에서 렌즈 각면의 곡률반경, 두께, 정렬오차에 따른 광파면의 왜곡 민감도는 Null 렌즈의 제작 및 측정계 구성의 용이성 여부를 판단하는 중요한 기준이 될 수 있다. 따라서 상대적 민감도를 비교하면 보다 나은 Null 측정계를 구성할 수 있다. 여기에서 측정하고자 하는 비구면은 비축 3 반사 광학계의 제 3 거울인 타원면(원추계수 >0)으로, autostigmatic 방식으로 설계한 Null 렌즈는 한 렌즈 곡률반경에 대하여 심한 광파면 왜곡 민감도를 보여 비구면 정밀측정이 용이하지 않음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서는 측정감도가 2배로 높으면서 작은 참조 평면경을 사용하는 그림 3과 같은 새로운 Null 렌즈 설

계방식을 제안한다. 그리고 이 방식을 사용하여 위에서 언급한 시험 비구면 측정용 Null 렌즈를 설계하고 autostigmatic 방식으로 설계한 Null 렌즈와 상대적 민감도를 조사하여 새로운 Null 렌즈 설계방식의 장점을 소개하고자 한다.

II. 설계개념

Null 렌즈 설계방식은 그림 1처럼 Null 렌즈를 통과한 광파면이 이상적인 비구면의 형상과 일치하도록 설계하는 autostigmatic 방식과 다른 하나는 그림 2와 같이 Null 렌즈와 이상적인 비구면의 조합으로 시준된 광파면을 만들도록 설계하는 자동시준 방식이 있다. 첫째 방식은 Null 렌즈를 통과한 광파면이 이상적인 비구면의 형상과 일치하도록 설계하는 방식으로 측정하고자 하는 시험 비구면의 이탈정도는 이상적 비구면을 기준으로 측정된다. 둘째 방식은 아주 편평한 평면이 기준면이 되며 평면을 기준으로 측정 비구면의 이탈정도를 측정하게 된다. 이 경우 빛은 시험 비구면에서 두번 반사하므로 측정감도는 2배로 높아지나 기준되는 평면의 크기가 측정 비구면보다 커야하는 단점이 있다.

그림 3은 소형 평면 기준면을 사용하면서 측정감도를 2배로 높여 측정할 수 있는 새로운 혼합방식(mixed) 측정 광학계이다. 이 방식은 그림 1과 그림 2를 조합한 방식으로 Null 렌

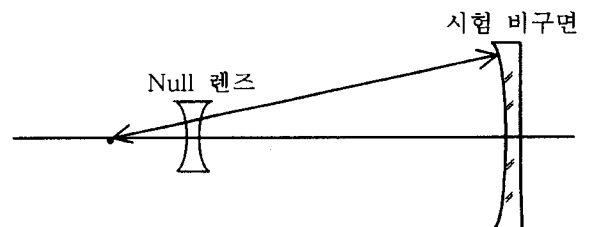


그림 1. Autostigmatic 방식.

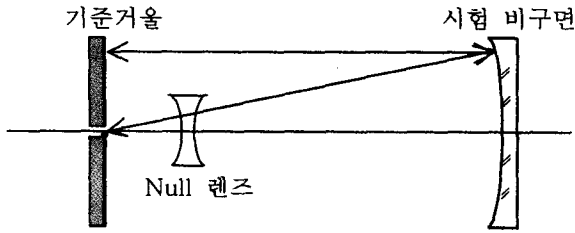


그림 2. 자동시준 방식.

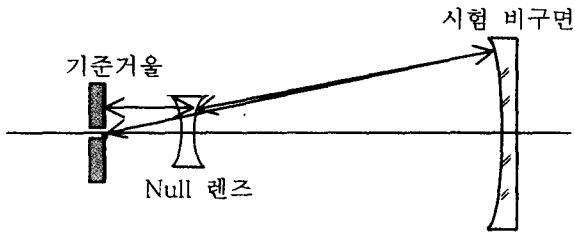


그림 3. 혼합 방식.

즈를 통과하여 시험 비구면에서 반사한 광선은 다시 Null 렌즈를 통과한 후 시준광선이 되도록 만들어 준다. 이 경우 환형 기준거울에서 반사된 광선은 역광로를 따라 원래 위치로 되돌아간다. 따라서 측정광선은 시험 비구면에서 2번 반사하게 되며, 비구면의 형상오차는 4배로 증폭되어 출력 광파면에 나타나게 된다. 이와 같은 Null 측정 광학계는 환형거울로 인하여 중앙부위를 측정할 수 없지만 중앙부위가 없는 거울이나 비축 반사경의 측정에 용이하게 이용할 수 있다.

III. 시험 비구면

본 연구에서의 시험 비구면은 그림 4와 같이 쌍곡면, 구면 및 타원면으로 구성된 비축 3반사 광학계의 제3거울인 타원면이다.^[5] 광학계의 시계는 x축 0.1도, y축 3도이며 반사경들의 광축은 일치한다. 중심 시계는 전체 광학계의 광축에 4.5° 기울어져 있으며 구경 스톱은 제2반사경에 있다. 제1반사경과 제3반사경의 정점은 일치하며, 따라서 제1반사경과 제2반사경간 거리는 제3반사경과 제2반사경간 거리와 같다. 제3반사경인 타원면의 형상은 그림 5와 같으며 곡률반경은 1420.834 mm이고 원추계수는 0.19646이며 직경은 468 mm이다.

이 타원면에서 stigmatic 점인 두 초점사이의 거리 D_1 과 타원면의 정점으로부터 초점사이의 거리 D_2 는 다음식으로 구해진다.

$$D_1 = \frac{r}{k+1} [2\sqrt{k}]$$

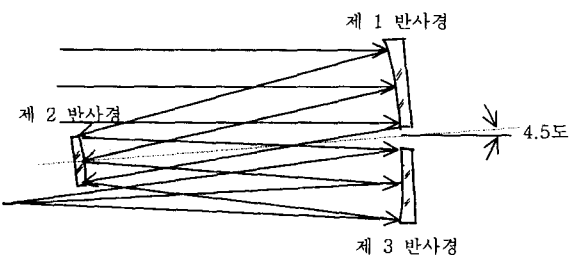


그림 4. 비축 3 반사 광학계.

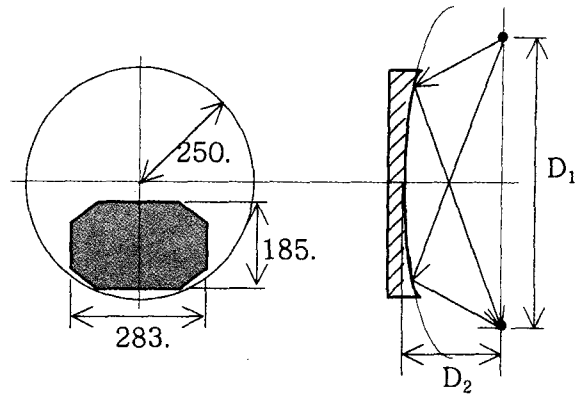


그림 5. 타원면 외부형상 및 stigmatic 점.

$$D_2 = \frac{r}{k+1}$$

여기서 r 은 곡률반경, k 는 원추계수를 나타내며 주어진 값을 대입하면 $D_1 = 1052.49$ mm, $D_2 = 1186.91$ mm가 된다. 위와같은 타원면은 두 stigmatic 점을 이용하여 형상을 측정할 수도 있으나^[6] 두 초점간의 간격도 크고 거울간 거리도 멀어 정렬이 어렵고 정밀하게 측정하기가 쉽지 않다.

IV. 측정계 설계 및 분석

그림 5의 타원면을 시험하기 위한 Null 렌즈를 SIGMA 2000 프로그램을 사용하여 설계하였다. Null 렌즈는 autostigmatic 방식과 혼합 방식의 두 종류를 설계하였으며 특성을 비교하였다. 두 방식 모두 비구면 반경 250 mm 까지 측정 가능하고 설계된 측정계의 최대 광로차는 $\lambda/50$ 이하가 되도록 최적화한다. Null 렌즈의 민감도는 렌즈의 곡률반경,

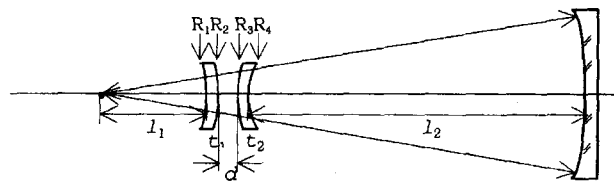


그림 6. Autostigmatic Null 렌즈 설계.

표 1. Autostigmatic Null 렌즈 설계 데이터

번호	곡률반경	두께	재질	비구면 계수	가장자리 광선높이
점광원	421.02(l_1)		air		
1	-54.566	10.00	Schott-BaF50		
2	-110.189	12.00	air		
3	186.220	10.00	Schott-BaF50		
4	139.071	1296.20(l_2)	air		
측정타원면	-1420.834	-1296.20	반사면	cc=0.19646	250.0
6	139.071	-10.00	Schott-BaF50		
7	186.220	-12.00	air		
8	-110.189	-10.00	Schott-BaF50		
9	-54.566	-421.02	air		

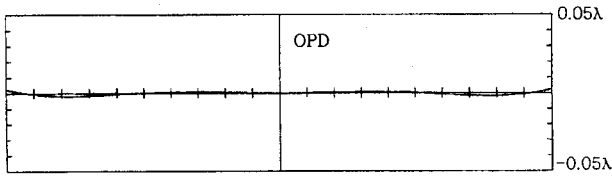


그림 7. Autostigmatic Null 렌즈의 광로차(OPD).

표 2. Autostigmatic Null 렌즈 민감도

	l_1	렌즈 1			d	렌즈 2			l_2
		R_1	t_1	R_2		R_3	t_2	R_4	
민감도 (ΔOPD)	$\lambda/35$	11.9λ	$\lambda/1.4$	$-\lambda/3$	$\lambda/2.8$	$\lambda/7$	$\lambda/63$	$\lambda/3.5$	$\lambda/1.9$

두께 및 정렬오차등 각각에 대하여 0.01 mm의 변화에 따른 광로차 변화량으로 나타내어 상대적인 특성을 비교하였다.

그림 6은 autostigmatic 방식으로 설계한 비구면 측정 Null 렌즈 광학계이다. 광학계는 렌즈 2매로 구성하여 $\lambda/50$ 이하의 광로차를 갖게 되며 두 렌즈간은 12 mm 정도 간격을 두어 정렬이 용이하도록 설계하였다. 광학계 설계 데이터 및 광로차는 표 1 및 그림 7과 같다. 표 1의 데이터는 점광원 p에서 출발하여 측정 비구면에서 반사되어 점광원 p로 되돌아 나오는 경로의 데이터이며 최대 광로차는 $\lambda/100$ 이하이다.

표 2는 Null 렌즈 민감도를 보여준다. 여기서 민감도는 각면의 곡률반경, 두께 및 정렬위치를 최적 설계값으로부터 각각 0.01 mm씩 변화시켜 가며 구한 광로차 변화량이다. 민감도는 위의 변화량에 대하여 거의 선형적인 값을 갖기 때문에 렌즈의 곡률반경 및 두께변화에 기인한 광로차 변화는 렌즈의 위치를 상대적으로 조정함으로써 항상 Null 기능을 수행할 수 있다.

위의 Null 렌즈계는 R_1 값에 최대 민감도를 보인다. R_1 값의 변화 0.01 mm에 대하여 광학계는 11.9λ 의 최대 광로차 변화를 보인다. 이는 R_1 의 곡률반경값 110.189 mm에 대하여 0.009%의 측정오차가 발생하면 광학계는 11.9λ 의 광로차 변화를 야기함을 의미한다. 따라서 위의 Null 렌즈 광학계에서 비구면 측정 정밀도는 곡면 R_1 값의 제작 및 측정 정밀도에 크게 의존함을 알 수 있다.

그림 8은 혼합 방식으로 설계한 비구면 측정 Null 렌즈 광학계이다. 광학계는 렌즈 1매와 환형거울로 $\lambda/50$ 이하의 광로차를 갖게되며 환형거울의 위치는 점광원이 놓이는 위치에 설정하여 환형거울의 뚫린 부분에 의해 측정할 수 없는 부위를 최소화하였다. 위에서와 마찬가지로 표 3의 데이터는 점광원 p에서 출발하여 측정 비구면에서 반사되어 점광원 p로 되돌아

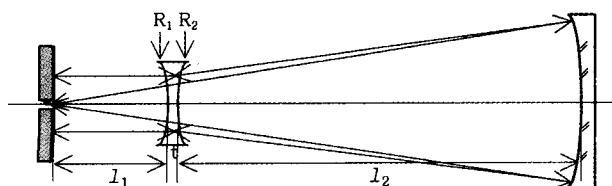


그림 8. 혼합방식 Null 렌즈 설계.

표 3. 혼합방식 Null 렌즈 설계 데이터

번호	곡률반경	두께	재질	비구면 계수	가장자리 광선 높이
점광원		63.78(11)	air		
1	-301.034	5.00	Hoya-F2		
2	292.180	1280.00(12)	air		
3	-1420.834	-1280.00	반사면	cc=0.19646	250.0
4	292.180	-5.00	Hoya-F2		
5	-301.034	-63.78	air		
6	∞	63.78	기준거울		
7	-301.034	5.00	Hoya-F2		
8	292.180	1280.00	air		
9	-1420.834	-1280.00	반사면	cc=0.19646	
10	292.180	-5.00	Hoya-F2		
11	-301.034	-63.78	air		

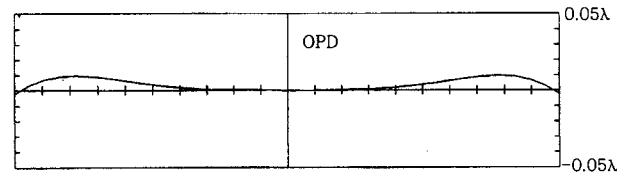


그림 9. 혼합방식 Null 렌즈의 광로차(OPD).

표 4. 혼합방식 Null 렌즈 민감도

	l_1	렌즈 1			l_2
		$R1$	t	$R2$	
민감도 (ΔOPD)	$\lambda/2.8$	$\lambda/5.7$	$\lambda/3$	$\lambda/5.2$	λ

나오는 경로의 데이터이며 최대 광로차는 그림 9에서 보이듯이 $\lambda/100$ 정도이다.

표 4는 Null 렌즈 민감도로서 앞에서와 마찬가지로 민감도는 각면의 곡률반경, 두께 및 렌즈 위치의 0.01 mm 변화값들에 대하여 거의 선형적인 값을 갖기 때문에 렌즈 각면의 곡률반경 및 두께의 정밀한 측정만 이루어지면 상대적으로 정렬 위치를 조정함으로써 항상 Null 기능을 수행할 수 있게 되어 있다.

위의 Null 렌즈계는 l_2 값에 최대 민감도를 보인다. l_2 값의 변화 0.01 mm에 대하여 광학계는 광로차 λ 의 변화를 보인다. 따라서 $\lambda/10$ 정도의 광로차 오차를 얻으려면 l_2 값의 측정 정밀도는 1 μ m의 측정 정밀도를 가져야 한다. 따라서 위의 Null 렌즈 광학계에서 비구면 측정 정밀도는 l_2 값의 측정 정밀도에 크게 의존함을 알 수 있다.

이상에서 본 바와 같이 비구면 Null 측정 광학계 설계는 autostigmatic 방식이나 혼합 방식중 어느것을 써도 가능하다. autostigmatic 방식일 경우, 광파면의 왜곡은 거울형상 오차의 2배로 나타나므로 비구면의 형상오차가 $\lambda/10$ 이면 $\lambda/5$ 의 광파면 왜곡이 발생한다. 반면에 혼합방식에서는 광파면 왜곡이 거울형상 오차의 4배로 나타나므로 $\lambda/2.5$ 의 광파면 왜곡이 발생한다. 따라서 autostigmatic 방식의 경우 $\lambda/5$ 이하의 광파면 왜곡을 갖는 Null 렌즈 측정계를 구성하려면 가장 민감도가 큰 곡률반경 $R1$ 과 거리 간격이 멀어 측정이 곤란한 l_2 의 측

정오차는 각각 R1의 0.0002% 이하 및 $\pm 4 \mu\text{m}$ 이하의 위치 정밀도를 가져야 한다. 혼합방식의 경우, 마찬가지로 거리 간격이 멀어 측정이 곤란한 I_2 의 측정오차가 가장 민감하게 광파면 왜곡을 야기시키며, $\lambda/2.5$ 의 광파면 왜곡을 가지려면 I_2 의 측정오차는 $\pm 4 \mu\text{m}$ 이하가 되어야 한다. 위의 설계를 기준으로 보면 autostigmatic 방식보다 혼합방식이 더 유리한 측정 Null 광학계임을 알 수 있다.

V. 결 론

타원면(원추계수 >0)과 같이 stigmatic 점이 광축에 있지 않은 비구면 측정시 유용하게 쓰일 수 있는 새로운 혼합방식 Null 측정 광학계를 제안하고 설계하였다. 민감도 조사결과 혼합방식으로 설계된 Null 렌즈는 autostigmatic Null 렌즈보다

제작 및 측정이 용이함을 알 수 있었다. 이와같은 혼합방식은 환형거울로 인하여 중앙부위를 측정할 수 없지만 중앙 부위를 사용하지 않는 비축 반사경 측정 광학계로 사용 가능하며 측정 감도가 2배 정도 높게 측정할 수 있는 장점이 있다. 또한 이 방식을 이용하면 대구경 포물면경 측정시에도 소형 거울로 쉽게 측정할 수 있다.

참고문헌

- [1] J.C. Wyant, SPIE **816**, 19 (1987).
- [2] A. Offner, Appl. Opt. **2**, 153 (1963)
- [3] D. R. Shafer, Appl. Opt. **18**, 3863 (1979).
- [4] D. T. Puryayev, Opt. & Laser Technol. **28**, 327 (1996).
- [5] R. Geyl, SPIE **2210**, 739 (1994).
- [6] E. Everhart, Appl. Opt. **5**, 717 (1966).

Null lens design for testing of elliptical surface

Yeon Soo Kim and Byoung Yoon Kim*

Agency for Defence Development, Taejon 305-600, Korea

*Department of Physics, Korea Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

Yun Woo Lee

Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, Korea

(Received May 2, 2000, Revised manuscript received June 21, 2000)

The null lens is designed for testing the elliptical (conic constant >0) mirror which is the third mirror of the off-axis Three Mirror Anastigmat (TMA) designed as a high resolution camera for remote sensing. The mixed type design is proposed as a new design type which has a small annular flat mirror, but has as twice sensitivity as the autostigmatic type design. It is also shown that the null lens of the Mixed type is better than that of the autostigmatic type in terms of the sensitivity of the wavefront distortion which is given as the magnitude of optical path difference with respect to the change of each surface parameters such as the radius of curvature, thickness of lenses and tested mirror.

OCIS codes : 120.6650, 220.2740.