

쌍곡면 측정 null 렌즈 설계

김연수[†]

국방과학연구소 기술연구본부 1-3

☎ 305-600 대전시 유성우체국 사서함 35-5호

김병윤

한국과학기술원 물리학과

☎ 305-701 대전시 유성구 구성동 373-1번지

이윤우

한국표준과학연구원 양자연구부 영상그룹

☎ 305-340 대전시 유성구 도룡동 1번지

(2001년 4월 19일 받음, 2001년 8월 1일 수정본 받음)

고해상도 원격관측용 카메라로 설계된 비축 3반사 광학계의 제1거울인 쌍곡면 형상 측정을 위한 null 렌즈를 설계하였다. Null 렌즈는 autostigmatic 방식과 mixed 방식으로 설계하였으며, 렌즈의 곡률반경, 두께등의 변수에 대한 상대적 민감도를 비교 분석하여 보다 측정이 용이한 null 렌즈를 제시하였다.

분류코드 : SM.010, SM.040.

I. 서 론

Null 렌즈는 특히 고해상도 우주망원경등에 쓰이는 대구경 비구면 거울과 같이 고정도의 측정이 요구될 때 자주 이용되고 있다. Null 렌즈는 여러 형태가 있으며,^[1,2] 크게 autostigmatic 방식,^[3-5] autocollimation 방식 및 혼합방식^[6,7]으로 나눌 수 있다. autostigmatic 방식은 null 렌즈를 통과한 광파면이 이상적인 비구면 형상이 되도록 설계하여 측정 비구면과 간섭적으로 비교하는 방식으로 작은 렌즈들로 구성할 수 있는 장점을 가진다. autocollimation 방식은 null 렌즈와 비구면의 조합으로 시준된 광파면을 만들도록 설계하는 방식이다. 빛은 시험 비구면에서 두번 반사하므로 측정감도는 2배로 높아지나 기준 되는 평면의 크기가 측정 비구면보다 커야하는 단점이 있다. 따라서 측정 비구면의 구경이 클 때 채택하기 어려운 null 렌즈 형태이다. 혼합방식은 그림 1에서 보이듯이 autostigmatic 방식과 autocollimation 방식이 혼합된 것으로서 두 방식의 장점을 모두 갖는다. null 렌즈를 통과한 후 시험 비구면에서 반사된 광선은 입사광과 다른 경로를 따라 역으로 진행하며 다시 null 렌즈를 통과한 후 시준광선이 된다. 그림 1은 점 광원에서 시작하여 시준광선이 되기까지의 광 경로를 보여준다. 시준된 광선은 환형 기준거울에서 반사된 후 왔던 광로를 역으로 따라가며 원래 위치로 되돌아간다. 따라서 측정광선은 시험 비구면에서 2번 반사하게 되며, 비구면의 형상오차는 4 배로 증폭되어 출력 광파면에 나타나게 된다. 따라서 혼합방식은 소형 기준거울을 사용하지만 감도는 autostigmatic 방식의

2배인 측정계가 된다.

일반적으로 null 렌즈는 비구면 파면을 만드므로 적어도 2 장 이상의 렌즈로 구성된다. 또 출력 파면이 비구면 파면이므로 렌즈의 곡률반경, 두께 및 렌즈간 거리등을 측정하는 방법 외에 달리 null 렌즈를 평가할 수 있는 방법은 없다. 측정 비구면을 정밀하게 측정하기 위하여는 렌즈는 정밀하게 제작되고 측정되어야 한다. 따라서 렌즈의 곡률반경, 두께등의 변수에 대한 민감도는 측정용 null 렌즈 선택에 중요한 요소가 될 수 있다.

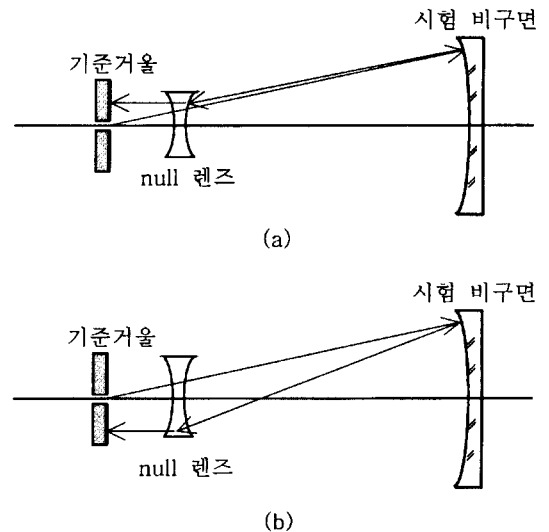


그림 1. 혼합방식 null 렌즈.

[†]E-mail: ykim@sunam.kreonet.re.kr

앞에서 기술한 바와 같이 autocollimation 방식은 측정 비구면 보다 더 큰 평면 기준거울이 필요하므로 대구경 비구면 측정 null 렌즈는 보통 autostigmatic 방식과 혼합방식으로 설계된다. 본 논문에서는 쌍곡면 측정 null 렌즈를 두 방식으로 설계하고 렌즈 변수에 대한 상대적 민감도를 비교함으로써 보다 나은 null 렌즈를 제시한다.

II. 시험 비구면

시험 비구면은 오목 쌍곡면, 볼록 구면 및 오목 타원면으로 구성된 비축 3반사 광학계^[8]의 제1거울인 쌍곡면이다. 일반적으로 원추곡면의 sag z 는 다음과 같이 주어진다.^[9]

$$z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - c^2(1+k)h^2}} \quad (1)$$

h 는 원추곡면상의 점으로부터 광축까지의 거리이고 c 는 광축상에서의 곡률반경이다. 원추계수 k 가 $k < -1$ 이면, 원추곡면은 쌍곡면이 된다. 측정 쌍곡면 거울의 형상은 그림 2와 같으며, 곡률반경은 3056.65 mm, 원추계수는 -1.59658 , 직경은 560 mm이다. 쌍곡면의 stigmatic 점인 두 초점은 다음식으로 구할 수 있다.^[10]

$$F_1 = \frac{r}{(k+1)}[\sqrt{-k}+1] \quad (2)$$

$$F_2 = \frac{r}{(k+1)}[\sqrt{-k}-1] \quad (3)$$

r 은 곡률반경, k 는 원추계수를 나타내며 주어진 값을 대입하면 $F_1 = 11597.62$ mm, $F_2 = 1350.37$ mm가 된다. 위와같은 오목 쌍곡면은 두 stigmatic 점을 이용하여 Silvertooth 방식으로 측정할 수 있다.^[10] 이 경우 곡률반경 10 m 정도의 중앙 홀이

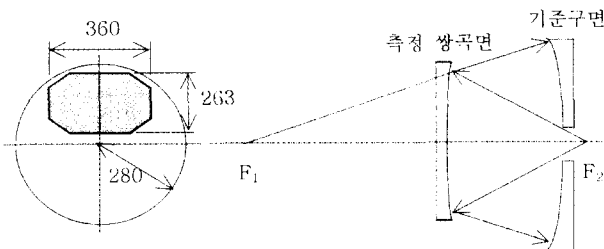


그림 2. 측정 쌍곡면 거울 외부형상 및 stigmatic 점.

뚫린 기준 구면경이 필요하며, 이와 같은 거울은 만들기가 쉽지 않다. 따라서 이와 같은 쌍곡면은 null 렌즈를 이용한 측정이 더 바람직하다.

III. 측정계 설계 및 분석

null 렌즈는 렌즈 설계 프로그램인 SIGMA 2000을 사용하여 autostigmatic 방식과 혼합 방식의 두 종류로 설계하였다. 두 방식 모두 렌즈 2매로 구성하여 비구면 반경 280 mm까지 측정이 가능하도록 설계하였다. 설계된 null 렌즈를 평가하기 위한 방법으로 렌즈 변수에 대한 민감도를 조사하였다. 민감도는 각면의 곡률반경, 두께 및 렌즈간 거리를 최적 설계값으로부터 각각 0.01 mm씩 변화시켜 가며 구한 광로차의 peak-to valley 값이다.

그림 3은 autostigmatic 방식으로 설계한 쌍곡면 측정 null 렌즈 광학계로 측정대상 비구면까지 진행하는 광 경로를 보여 준다. 광학계는 Offner null 렌즈와 유사한 형태를 취하며 입사광선은 무한 물점을 갖는 시준 광선이다. 여기서 첫번째 렌즈의 입사면은 평면으로 하여 이 렌즈의 두께 변화에 의한 광로차 변화를 없애 제작이 비교적 간편하도록 설계하였다.

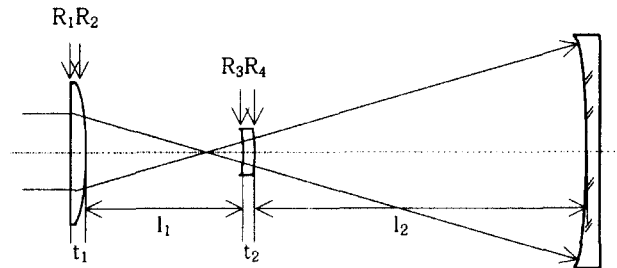


그림 3. Autostigmatic null 렌즈 설계.

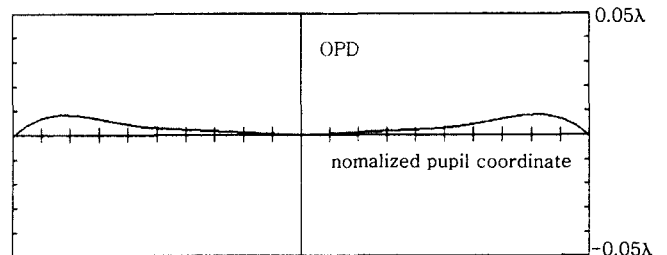


그림 4. Autostigmatic null 렌즈의 광로차(OPD).

표 1. Autostigmatic null 렌즈 설계 데이터

번호	곡률반경	두께	재질	비구면계수	가장자리 광선높이
무한점광원	∞	0	Air		
1	-151.043	9.78	Schott-BaF50		
2	-23.795	268.43(11)	air		
3	-27.835	14.89	Schott-BaF50		
쌍곡면	-3056.65	3032.31(12)	반사면	$cc = -1.59658$	280 mm
5	-27.835	-3032.31	Schott-BaF50		
6	-23.795	-14.89	air		
7	-151.043	-268.43	Schott-BaF50		
8	∞	-9.78	air		

표 2. Autostigmatic null 렌즈 민감도

	렌즈 1			l_1	렌즈 2			l_2
	R_1	t_1	R_2		R_3	t_2	R_4	
민감도(Δ OPD)	-	-	$\lambda/2.7$	$\lambda/4.5$	$\lambda/10.5$	$\lambda/3.3$	$\lambda/5.3$	$\lambda/7.9$

광학계 설계 데이터는 표 1로 시준된 입사광선에서 출발하여 측정 비구면에서 반사되어 다시 원위치로 되돌아 나오는 경로를 보여준다. 그림 4는 설계된 null 렌즈 측정 광학계의 광로차로 peak-to valley는 $\lambda/100$ 이하임을 보여준다.

표 2는 null 렌즈 민감도를 보여준다. 민감도는 렌즈 변수의 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 평면인 R_1 값과 두께 t_1 에 대하여 민감도는 0이다. 곡률반경에 있어서 광로차 최대 민감도는 R_2 값에서 나타나며, 0.01 mm의 변화에 대하여 광학계는 $\lambda/2.7$ 의 광로차 변화를 보인다. 또 렌즈간 거리에 있어서는 민감도는 작지만 상대적으로 긴 l_2 에서 최대 민감도가 나타난다.

그림 5는 혼합 방식으로 설계한 쌍곡면 측정 null 렌즈 광학계로 측정대상 비구면을 통과하여 환형거울까지 진행하는 광 경로를 보여준다. 광학계는 렌즈 1매와 환형거울로 구성되며, 환형거울의 위치는 점광원이 놓이는 위치에 설정하여 환형거울의 뚫린 부분에 의해 측정할 수 없는 부위를 최소화하였다.

앞에서와 마찬가지로 표 3의 데이터는 점광원 p에서 출발하여 측정 비구면에서 반사되어 점광원 p로 되돌아 나오는 경로의 데이터이다. 타원면 측정 혼합식 null 광학계와는 달리, 쌍곡면 측정 혼합식 null 광학계에서는 그림 1의 (b)와 같이 null 렌즈와 쌍곡면사이에 결상점이 생기는 것을 알 수 있다.¹⁶ 타원면 측정의 경우와 같이 중간에 결상점이 없는 null 렌즈는 설계가 되지 않는다.

그림 6은 광로차를 나타내며 표 4는 null 렌즈 민감도를 보여준다. 광로차의 peak-to-valley는 $\lambda/16.6$ 정도이다.

위의 null 렌즈는 곡률반경 R_2 값의 변화에 매우 민감하며, 0.01 mm의 곡률반경 변화에 대하여 광학계는 1.2λ 의 광로차

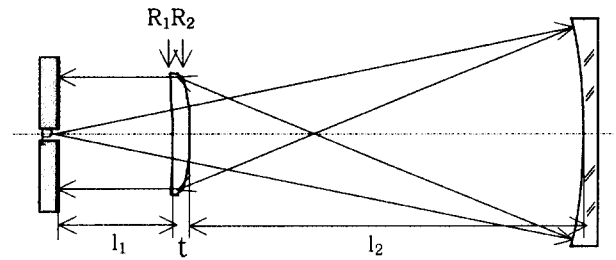


그림 5. 혼합방식 null 렌즈 설계.

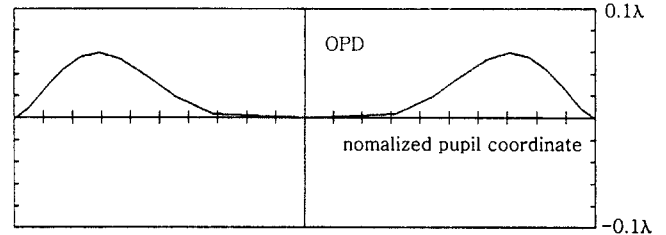


그림 6. 혼합방식 null 렌즈의 광로차(OPD).

변화를 보인다. 또 곡률반경 R_1 의 경우, 0.01 mm 오차에 대하여 민감도는 $\lambda/20$ 정도이지만 R_1 값이 1086.18 mm이므로 곡률반경 오차가 0.00092% 정도가 되어 정밀 제작 및 측정이 쉽지 않다.

이상에서 본 바와 같이 쌍곡면 측정 null 렌즈 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 방식에서 $\lambda/5$ 이하의 광파면 왜곡을 갖는 null 렌즈 측정계를 구성하려면 가장 민감도가 큰

표 4. 혼합방식 null 렌즈 민감도

	l_1	렌즈 1			l_2
		R_1	t	R_2	
민감도(OPD)	$\lambda/1.2$	$\lambda/20$	$\lambda/1.5$	1.2λ	$\lambda/3.7$

표 3. 혼합방식 null 렌즈 설계 데이터

번호	곡률반경	두께	재질	비구면 계수	가장자리 광선높이
점광원		252.96(11)	air		
1	-1086.18	10.00	Schott-SF3		
2	-229.25	2977.54(12)	air		
쌍곡면	-3056.65	-2977.54	반사면	cc = -1.59658	280 mm
4	-229.25	-10.00	Schott-SF3		
5	-1086.18	-252.96	air		
기준거울	∞	252.96	반사면		
7	-1086.18	10.00	Schott-SF3		
8	-229.25	2977.54	air		
쌍곡면	-3056.65	-2977.54	반사면	cc = -1.59658	280 mm
10	-229.25	-10.00	Schott-SF3		
11	-1086.18	-252.96	air		

곡률반경 R_2 은 $5.4 \mu\text{m}$ 이하 또는 0.022%의 제작 또는 측정 오차를 가져야 하며, 거리 간격 l_2 의 정렬은 오차 ($9 \mu\text{m}$ 이하)로 이루어져야 한다. 혼합방식의 경우, 민감도가 큰 곡률반경 R_2 는 $\lambda/2.5$ 의 광파면 왜곡을 가지려면 $3.3 \mu\text{m}$ 이하 또는 0.0014%의 정밀도를 가져야 하며, 비교적 큰 수치를 갖는 곡률반경 R_1 은 0.0073% 이하, 거리 간격 l_2 는 $14.8 \mu\text{m}$ 이하의 정밀도로 정렬되어야 한다. 따라서 위의 쌍곡면 측정 null 렌즈의 경우, 민감도를 상대적으로 비교해보면 autostigmatic null 렌즈가 혼합방식보다 측정이 용이한 광학계임을 알 수 있다.

IV. 결 론

곡률반경 3056.65 mm, 원추계수는 -1.59658 , 직경 560 mm 인 쌍곡면 거울 측정용 null 렌즈를 autostigmatic 방식과 혼합방식으로 설계하였다. autostigmatic null 렌즈는 입사광선으로 시준 광선을 취하는 Offner null 렌즈의 형태를 갖는다. 렌즈의 곡률반경, 두께등의 변수에 대한 민감도 분석 결과, 시험대상 쌍곡면에 대하여는 autostigmatic null 렌즈가 제작 및 측정에서 보다 용이한 광학계임을 알 수 있었다. 이와 같은 렌즈 설계 및 분석과정은 다른 비구면 거울 측정용 null 렌즈 설계에도 응용할 수 있다.

참고문헌

- [1] D. Malacara, *Optical Shop Testing* (Wiley, New York, 1978), Chapter 12.
- [2] 이종웅, "비구면 검사용 null 광학계의 설계," 제10회 광기술 워크샵 논문집, pp. 25-41, 2000.
- [3] A. Offner, "A null corrector for paraboloidal mirrors," *Appl. Opt.*, vol. 2, p. 153, 1963.
- [4] D. R. Shaffer, "Zoom null lens," *Appl. Opt.*, vol. 18, p. 3863, 1979.
- [5] D. T. Puryayev, "Concept for testing two-mirror optical telescope," *Opt. & Laser Technol.*, vol. 28, p. 327, 1996.
- [6] 김연수, 김병윤, 이윤우, "타원면경 측정 null 렌즈설계," 한국광학회지, 제14권 4호, pp. 246-249, 2000.
- [7] Y. S. Kim, B. Y. Kim, and Y. W. Lee, "Design of null lenses for testing of elliptical surface," *Appl. Opt.*, vol. 40, no. 19, pp. 3215-3219, 2001.
- [8] R. Geyl, "Design and fabrication of three mirror flat field anastigmat for high resolution earth observation," *Proc. SPIE*, vol. 2210, p. 739, 1994.
- [9] W. J. Smith, *Modern Optical Engineering* (McGraw-Hill, New York, 1990).
- [10] J. C. Wyant, "Interferometric testing of aspheric surfaces," *Proc. SPIE*, vol. 816, p. 19, 1987.

Design of null lenses for testing of hyperbolic surfaces

Yeon Soo Kim[†]

Agency for Defence Development, Technology Research Center, Daejeon 305-600, KOREA

[†]E-mail: ykim@sunam.kreonet.re.kr

Byoung Yoon Kim

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, KOREA

Yun Woo Lee

Korea Research Institute of Standards and Science, Image Technology Group, Daejeon 305-600, KOREA

(Received April 19, 2001 ; revised manuscript August 1, 2001)

A null lens is designed for testing the hyperbolic mirror which is the first mirror of the off-axis three mirror anastigmat (TMA) designed as a high resolution camera for remote sensing. To choose a better null lens system for the hyperbolic surface under test, both autostigmatic and mixed type null lenses are designed and analysed for sensitivity with respect to change of each surface parameter such as the radius of curvature and the thickness.

Classification codes : SM.010, SM.040.