

자동무수차점 방식 널 렌즈 광학계를 이용한 직경 450 mm(f/2.7) 포물면경의 제작 및 측정 평가

이영훈 · 조재홍[†] · 임천석

한남대학교 이과대학 광·전자물리학과
Ⓣ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

이윤우 · 양호순 · 이재협 · 이인원

한국표준과학연구원 나노광계측그룹
Ⓣ 305-600 대전광역시 유성구 도룡동 1

(2005년 12월 13일 받음, 2006년 3월 28일 수정본 받음)

직경 450 mm(f/2.7) 포물면경 제작을 위해 자동무수차점방식의 널 광학계를 설계 및 제작하였으며, 설계프로그램(CODE V)의 공차분석기법을 이용하여 널 광학계의 제작과 정렬 오차에 따른 측정 신뢰도를 이론적으로 검증하였다. 그리고 광학계를 실제로 구축하여 포물면경의 제작에 적용하였다. 또한, 널 렌즈를 사용하지 않고 평면거울만 사용하는 자동시준방식의 측정방법으로 포물경을 재평가하여, 역으로 자동무수차점방식의 널 렌즈 정렬오차에 의한 측정 신뢰도를 확인하였다.

주제어 : Autostigmatic, Autocollimation, Null lens, Tolerance analysis.

I 서 론

비구면 거울은 지속적이고 반복적인 측정과 수정에 의해 제작되는데, 제작된 비구면의 정밀도는 측정 장치의 측정 한계에 의해 좌우된다. 대표적인 비구면 형상측정법으로는 간섭계와 널 광학계를 이용한 널 테스트를 들 수 있다.^[1] 여기에서 널 테스트는 광원에 따라 구면파 또는 평면파가 널 렌즈를 통과 한 후 설계상의 위치에서 이상적인 비구면 파면을 갖도록 하여 시험비구면에서 반사 한 후 되돌아온 수차를 갖는 파면과 기준파면에 의해 만들어진 간섭무늬를 측정하여 시험비구면을 평가하는 방법이다. 보통 널 테스트라고하면 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, CGH(Computer Generated Holographic)방식과 널 렌즈방식이 있다.^[2] 여기에서 널 렌즈 방식은 세 가지로 더 나눌 수 있으며, 자동시준방식과 자동무수차점방식 그리고 혼합방식이 있다.^[3]

대체적으로 비구면 측정에는 CGH방식보다는 널 렌즈방식을 많이 이용하는데, 이유로는 저가의 제작비와 제작된 널 렌즈에 대한 측정의 용이성 등을 들 수 있다.^[4] 그러나 널 렌즈 방식 중에서도 자동시준방식의 경우, 평면기준거울을 제작하는데 꽤 많은 제작비용이 들어가기 때문에 제작비가 저가라는 말은 옳지 않다. 더구나 시험렌즈의 직경이 1 m 이상으로 커지면 평면기준거울의 크기도 이에 따라 동일하게 커지므로 그 제작비용과 제작기간이 상당히 커지게 된다. 다만, 하나의 평면기준거울만으로 포물면거울(기준 평면거울 보다 큰 구경 제외)의 측정이 가능하다는 것과 한번 제작된 평면

기준거울을 영구적으로 사용할 수 있다는 것은 큰 장점이라 할 수 있다. 이에 반하여 자동무수차점 방식은 제작비용과 제작기간적 측면에서 직경이 1 m 이상인 대구경 망원경을 제작하고 평가하는데 적절한 방식이며, 포물면이 아닌 쌍곡면이나 타원면의 비구면도 측정이 가능하다.^[5-6]

본 논문에서는 대구경 망원경용 포물면 주경을 제작하고 성능을 평가하는데 있어서 자동시준방식보다 저가의 제작비용과 간단히 구성할 수 있으며 포물면, 쌍곡면, 타원면 등의 다양한 비구면 형상도 측정이 가능한^[5-7] 자동무수차점방식(2매 구성)의 널 테스트용 광학계를 설계하고 이를 제작하였으며, 이 방식을 이용해서 직경 450 mm(f/2.7) 포물면경을 제작하였다. 또한 앞으로 1 m 이상의 매우 큰 직경의 비구면 광학계를 제작하고 평가하는데 사용할 이 방식의 널 렌즈 정렬 오차에 대한 측정 신뢰도를 확보하기 위하여 직경 450 mm인 포물경을 대상으로 그 측정방식이 잘 정립되어있는 평면거울만을 사용하는 자동시준방식과 상호 비교하여 이 방식의 널 렌즈 정렬오차에 대한 측정신뢰도를 확인하고자 한다.^[8]

II. 널 광학계

본 절에서는 비구면 형상측정을 위한 널 광학계의 설계 데이터를 소개하였고, 가공 후 널 렌즈의 측정결과를 제시하였으며, 설계프로그램(CODE V)을 이용하여 제작오차에 의한 널 광학계의 측정정밀도를 평가해 보았다. 추가적으로 비구면 제작방법에 대해서 간략하게 소개하였다.

[†] E-mail: jhjo@hannam.ac.kr

2.1 널 광학계 설계

2.1.1 자동무수차점방식 광학계의 설계

표 1은 직경 450 mm($f/2.7$) 포물면경 측정을 위해 설계된 자동무수차점방식의 데이터이며,^[9] 그림 1은 자동무수차점방식의 개략도이다. 이와 같이 널 광학계로 2매 이상의 굴절렌즈를 사용하는 경우, 측정 시 다수의 변수(제작과 정렬 오차)들에 의해 측정 결과에 대한 신뢰도가 저하된다. 그러므로 비구면 형상을 정밀하게 진단하기 위해서는 널 광학계를 구성하고 있는 널 렌즈의 제작정도와 정렬 정밀도가 매우 중요하다. 보통 널 렌즈의 제작은 곡률반경과 렌즈의 두께 등 허용오차가 수 μm 또는 그 이상의 정밀도를 만족시켜야 하는데, 숙련된 기술자에 의해서 어렵지 않게 만들어진다. 이에 반하여 제작된 렌즈들을 μm 의 정밀도로 정렬하기란 매우 어려운 일이다. 그림 2는 2매 구성 널 렌즈 간 거리를 간섭계와 기준구면파 또는 평면파를 생성하는 모듈(Reference Transmission Sphere/Plate, RTS 또는 RTP)등을 이용하여 광학적인 방법으로 맞추는 과정을 소개한 것이며 정렬순서와 측정방법은 다음과 같다.^[10]

(1) 간섭계 앞 대략적인 위치에 시험비구면을 배치한다.

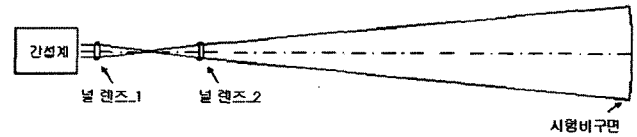


그림 1. 자동무수차점방식 광학계의 개략도.

- (2) 간섭계에 RTS($f/3.3$)를 장착하고 그림 2의 (a)와 같이 널 렌즈_2(S3)를 공초점 배치(confocal configuration)한다. 여기서 공초점이란 RTS의 초점과 널 렌즈_2의 첫면(S3)에서 입사경로와 같은 경로로 반사되어 만들어지는 상점이 일치함을 의미한다.
- (3) 간섭계에서 RTS($f/3.3$)를 RTP로 교체한 후, 정렬을 위해서 평면으로 가공된 S3면의 주변부를 이용해 간섭계와 널 렌즈_2의 기울기를 동일하게 만든다.
- (4) 방법 (2)와 방법 (3)을 반복 수행 한다(방법 (2)에 의해 RTS($f/3.3$)와 공초점 배치가 된 널 렌즈_2가 방법 (3)을 수행할 때 defocusing되는 정도를 최소화하기 위함).
- (5) 간섭계에 RTS($f/3.3$)를 장착하고 널 렌즈_1(S1)을 그림 2의 (b)와 같이 공초점 배치를 한다. 이때 널 렌즈_1의 형상은 양볼록으로 널 렌즈_2와는 달리 스스로 편심과 기울기를 제어하기가 어렵다. 본 논문에서는 이와 같은

표 1. 자동무수차점방식의 장치 구성 데이터 (단위 : mm).

면 번호	곡률 반경	두께	재질	구경크기 (반경)	비고	
물체	∞	∞ (기준 빔)	-	-		
1	널 렌즈_1	255.0	25.00	BK7	28.86	
2		-231.3	485.0		28.02	
3	널 렌즈_2	-255.0	25.00	BK7	31.66	
4		-187.1	2100		34.59	
5 (시험비구면)	-2473.0 Conic constant = -1	-2100	Zerodur	225	반사면	
6	널 렌즈_2	-187.1	-25.00	BK7	34.59	
7		-255	-485.0	-	31.66	
8	널 렌즈_1	-231.3	-25.00	BK7	28.02	
9		255.0	∞	-	28.86	
상	∞	0	-	-		

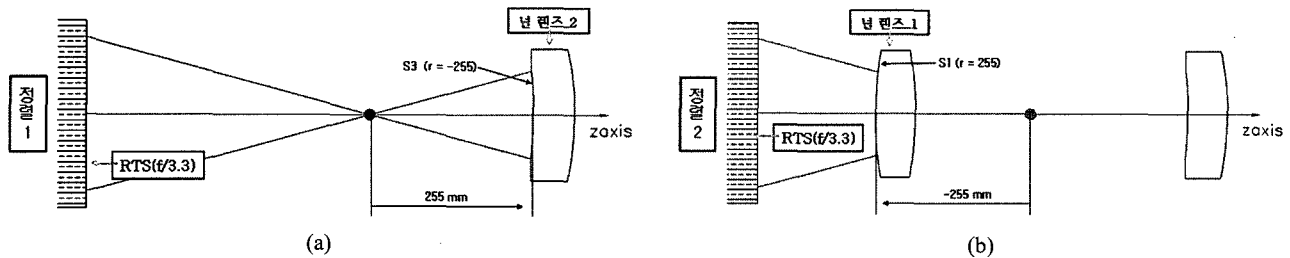


그림 2. 널 렌즈간 거리를 구속하기위한 구상도.

널 렌즈_1의 편심과 기울기를 해결할 목적으로 널 렌즈_1과 공초점을 갖는 RTS의 F-수를 고려하여 널 렌즈_1의 구경크기를 결정하였다. 결과적으로 널 렌즈_1의 구경크기를 RTS의 측정영역보다 다소 작게 제작하여 RTS와 널 렌즈_1의 공초점 배치 과정에서 발생하는 편심과 기울기를 제어하였다.

- (6) 간섭계에서 RTS(f/3.3)를 RTP로 교체 후, 시험비구면을 정렬한다. 이때, 시험비구면의 정렬 상태는 매우 정교하지 못하여, 그림 3과 같이 시험비구면에 반사 후 광-파면은 광축을 벗어나게 되고, 핀홀을 통과하지 못한다. 결과적으로 모니터를 이용한 시험비구면의 형상 측정이 불가능한 상태가 된다. 이때 시험비구면의 x, y, z 편심과 α , β 기울기를 미세 조정하여 정렬한다(시험비구면을 조정하므로 일차적으로 핀홀을 통과하지 못한 스폿(spot)의 크기를 최소화하고 다음으로 작아진 스폿을 광축으로 이동시킨다).
- (7) 결과 분석(시험비구면의 x, y 편심과 α , β 기울기 그리고 평면기준거울의 α , β 기울기를 미세 조정하여 시험비구면의 형상측정값이 최소가 되는 값을 구한다).

만약에 널 렌즈의 제작과 정렬 오차가 무시할 수 있는 작은 값을 갖는다면, 자동무수차점방식의 측정 정밀도는 RMS 0.0006 λ 를 갖게 된다. 여기에서 λ 는 632.8 nm를 기준으로 하였으며 본 논문의 모든 측정 정밀도에서 나오는 λ 는 이 값을 의미한다. 그러나 실제로 렌즈를 제작하고 정렬하는 과정에서 오차가 발생하게 되는데, 이는 널 테스트의 측정 정밀도를 저하시킨다. 표 2와 표3은 각각 널 렌즈의 제작과 정렬 오차

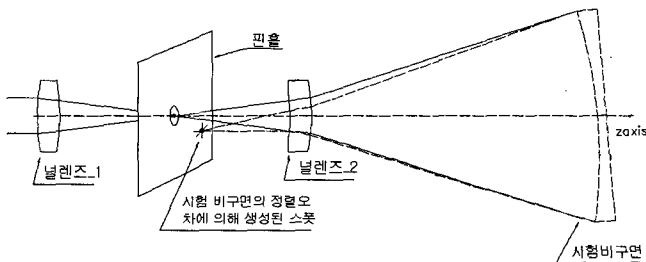


그림 3. 시험비구면 정렬(자동무수차점방식).

인데, 널 렌즈의 제작오차에 의한 측정 정밀도(시험비구면의 위치와 방향을 조정인자로 사용)는 RMS 0.0398 λ 를 갖게 되고, 정렬오차(표 3의 조건1)에 의해서는 RMS 0.0008 λ 를 갖게 된다. 여기서 복합적으로 발생하는 오차를 동시에 적용할 경우, 널 광학계의 측정 정밀도는 RMS 0.0398 λ 가 된다(시험비구면의 x, y, z 편심과 α , β 기울기는 보상자로 사용).

표 1의 데이터에서 사용된 매질의 굴절률은 Schott사가 제공하는 BK7의 굴절률($n = 1.51510$, $\lambda = 632.8$ nm)을 그대로 인용하였다. 표 2는 일반적인 널 렌즈의 제작허용오차라고 말할 수 있는데, 이와 같은 값(허용오차)들은 실제로 매우 정밀한 렌즈를 제작할 때 사용된다. 표 2에서 굴절률오차는 광학유리의 제작오차인데, 통상적으로 ± 0.001 의 굴절률 오차를 갖는다. 표 3은 정렬오차인데, 본 논문에서 정렬오차를 발생시키는 원인으로는 널 렌즈_1의 3축 직각방향으로의 x, y, z 편심과 수직 및 수평방향의 α , β 기울기만이 고려 대상이다(널 렌즈_2와 간섭계는 고정이며, 시험비구면의 3축 직각방향으로의 x, y, z 편심과 수직 및 수평방향의 α , β 기울기는 조정인자로 사용한다). 표 3에서 널 렌즈 간 거리 정렬오차란, 널 렌즈_1과 널 렌즈_2를 RTS(f/3.3)로 정렬할 때, 발생할 수 있는 z축에 대한 편심 값이다.

2.1.2 자동시준방식 광학계

표 4는 직경 450 mm(f/2.7) 포물면경 측정을 위한 자동시준방식의 설계 데이터이며, 그림 4는 자동시준방식의 광학적 개략도이다. 이와 같이 널 렌즈로 평면기준거울만을 사용하는 경우 정렬방법이 비교적 간단하며, 그 정렬 순서는 다음과 같다.

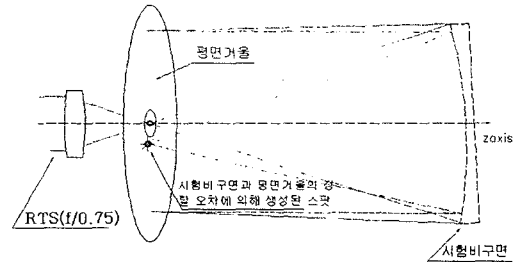


그림 4. 시험비구면 정렬(자동시준방식).

표 2. 널 렌즈의 제작 공차(허용오차).

렌즈	널 렌즈_1		널 렌즈_2	
	앞면	뒷면	앞면(평면)	뒷면
곡률반경 (fringe)	± 1.0	± 1.0	± 1.0	± 1.0
형상비대칭 (fringe)	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2
x방향 편심 (mm)		± 0.01		± 0.01
y방향 편심 (mm)		± 0.01		± 0.01
α 틸트 (min)		± 0.5		± 0.5
β 틸트 (min)		± 0.5		± 0.5
굴절률	± 0.001		± 0.001	
두께 (mm)	± 0.01		± 0.01	

표 3. 널 렌즈_1에 의해 유기되는 정렬오차.

렌즈	널 렌즈_1			
	경우 1	경우 2	경우 3	경우 4
정렬오차				
x방향 편심 (mm)	± 0.050	± 0.100	± 0.150	± 0.200
y방향 편심 (mm)	± 0.050	± 0.100	± 0.150	± 0.200
α 틸트 (min)	± 3.40	± 6.80	± 13.6	± 27.2
β 틸트 (min)	± 3.40	± 6.80	± 13.6	± 27.2
널 렌즈 간 거리 (mm)	± 0.020	± 0.040	± 0.080	± 0.160

표 4. 자동시준방식의 장치 구성 데이터 (단위 : mm).

면 번호	곡률 반경	두께	재질	구경크기 (반경)	비고
물체	스폿	1236.73	-	-	
1 (조리개)	-2473.46 Conic constant = -1	-1236.73	Zerodur	225.00	반사면
3	∞	1236.73	Zerodur	225.00	반사면
4	-2473.46 Conic constant = -1	-1236.73	Zerodur	225.00	반사면
상	스폿	0	-	-	

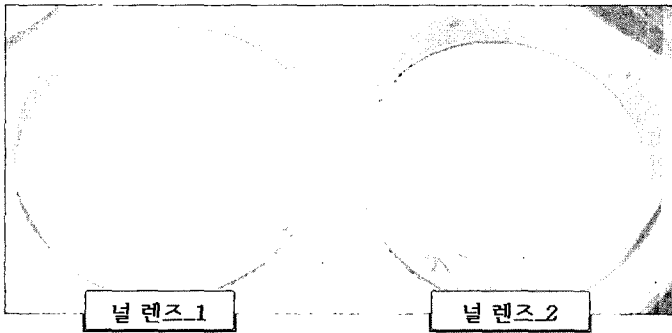


그림 5. 제작된 넬 렌즈

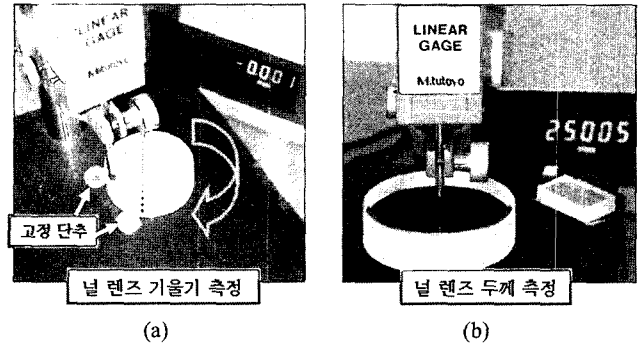


그림 6. (a) 넬 렌즈의 두께와 (b) 기울기 측정장치

- (1) 간섭계에 RTS($f/0.75$)를 장착한 후, 스폿을 생성하는 위치를 기록한다(여기서 스폿이 생성되는 지점으로부터 시험비구면까지의 거리는 시험비구면의 초점거리(f)와 같다).
- (2) RTS($f/0.75$)를 RTP로 교체하고 평면기준거울의 후면을 이용하여 평면기준거울의 α , β 기울기를 수정한다(거울 후면부의 상태가 연마 전단계인 경우, 작은 평면거울을 평면기준거울 후면에 밀착한 후, 평면기준거울의 α , β 기울기를 조정할 수 있다).
- (3) RTP를 RTS($f/0.75$)로 교체한 후, 스폿이 생성되는 지점으로부터 비구면의 초점거리만큼의 거리를 유지하며 시험비구면을 배치한다. 다음으로 스폿이 생성되는 대략적인 위치에 평면기준거울을 배치한다. 이때, 시험비구면의 편심과 기울기 그리고 평면기준거울의 기울기가 정렬 전이므로 그림 4와 같은 결과를 얻을 수 있다.
- (4) 일차적으로 시험비구면의 z축 편심을 조정하여 핀홀을 통과하지 못한 스폿의 크기를 최소화하고 다음으로 시험비구면과 평면기준거울의 편심과 기울기를 조정하여 작아진 스폿을 광축으로 이동시킨다.
- (5) 결과 분석(시험비구면의 x, y, z 편심과 α , β 기울기 그리고 평면기준거울의 α , β 기울기를 미세 조정하여 시험비구면의 형상측정값이 최소가 되는 값을 구한다).

일반적으로 포물면 측정을 위한 자동시준방식의 경우, 측정 정밀도의 한계는 거의 0에 가까운 $RMS\ 0.0000\lambda$ 를 갖게 된다. 그러나 실제로 넬 렌즈(평면기준거울)를 제작하는 과정에서 제작오차가 발생하게 되는데, $(1/10)\lambda$ 인 평면기준거울의 형상비대칭을 고려할 경우, 넬 광학계의 잔류 수차는 $RMS\ 0.033\lambda$ 를 갖게 된다(자동시준방식의 비구면 형상측정 시, 평

면기준거울과 시험비구면의 편심 및 기울기는 조정인자로 사용된다).

2.2 넬 렌즈 측정

그림 5는 연마가공 후 무반사코팅 처리된 2매의 넬 렌즈이다. 보통 넬 렌즈라고 하면, 평면거울과 굴절렌즈로 구분할 수 있지만, 제작방법은 거의 비슷하다. 이와 같은 넬 렌즈를 평가하기 위해서는 다양한 방법의 측정이 필요한데, 그림 6과 그림 7은 넬 렌즈를 측정하기 위한 몇 가지 방법들이며, 이를 이용한 넬 렌즈의 제작방법은 다음과 같다.

- (1) 광학유리(Schott, BK7)의 굴절을 제작오차(크라운; ± 0.0005 , 프리트; ± 0.001)를 고려하여 가공하고자하는 광학유리의 일부분을 절단 가공하여 프리즘으로 가공한 후 그림 7(a)와 같이 측각도계(goniometer)를 이용하여 굴절률을 측정한다. 이때, 측각도계의 정밀도와 측정 등의 오차를 고려하여 굴절률을 반복 측정하고 결과로는 평균값을 사용한다.^[11,12] 표 5는 상온에서의 파장이 적색(Red, 643.8 nm), 초록색(Green, 546.1 nm), 청색(Blue, 480 nm)에 대한 측정값과 이 측정값들을 사용하여 설계프로그램(CODE V)의 private catalog 기능으로 계산한 $\lambda = 632.8$ nm의 굴절률($n = 1.51488$)을 보여준다. 이 값은 앞서 표 1에서 BK7 굴절률인 $n = 1.51510(\lambda = 632.8\text{ nm})$ 과는 -0.00022 의 차이가 나는데, Schott사의 보통 광학유리 제작법인 상온에서의 Step 3에서 굴절률 제작오차 범위인 ± 0.0005 내에 들어감을 확인할 수 있기 때문에 이 측정값을 BK7의 굴절률 값으로 사용한다.^[13]
- (2) 최종 설계데이터에 따라서 렌즈를 제작하게 되는데, 우

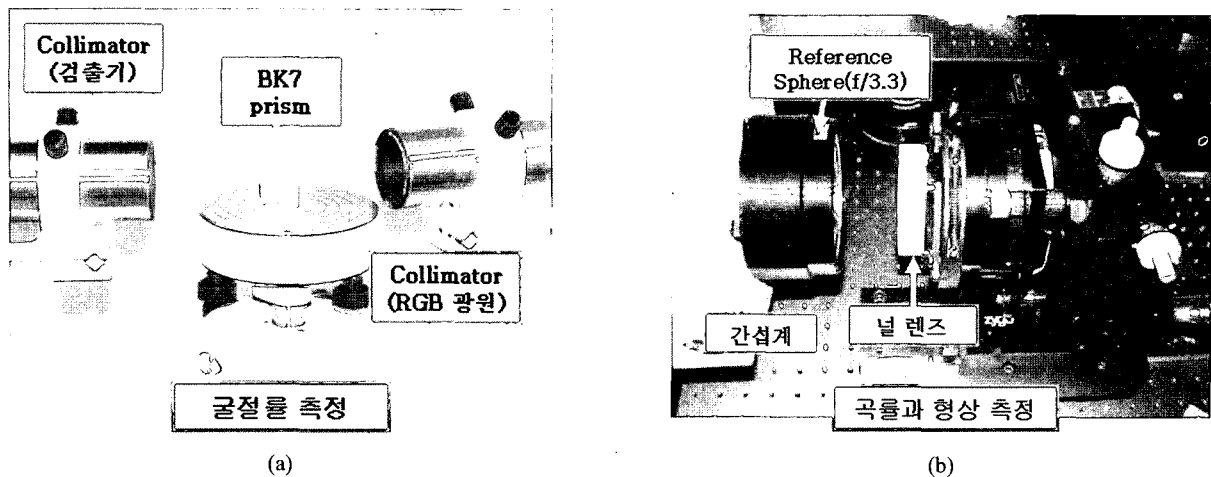


그림 7. (a) 널 렌즈의 곡률과 (b)굴절률 측정장치.

표 5. 광학유리의 굴절률 측정 결과(상첨자* : 측정값, 상첨자** : 계산값).

파장	643.80 nm(R)	546.10 nm(G)	480.00 nm(B)	632.80 nm
‘glass’ (prism)	1.51452*	1.51854*	1.52284*	1.51488**

표 6. 널 렌즈의 제작 후 각종 제원들(상첨자* : 측정값, 상첨자** : 계산값).

렌즈	널 렌즈_1		널 렌즈_2	
	s1(s9)	s2(s8)	s3(s7)	s4(s6)
곡률반경 (mm)	255.042*	-227.828*	-254.974*	-187.413*
두께 (mm)	25.005*		25.005*	
형상비대칭(fringe)	1/10λ (λ=632.8 nm)*			
굴절률 (632.8 nm)	1.51488**			

선 유리 덩어리를 설계치보다 약간 크게 육면체로 절단하고, 다음으로 주변 모서리부분을 절단하는 방법을 사용하여 다면체 형상으로 만든다.

- (3) 방법 (2)에 의해서 렌즈는 약간 좁 영성한 실린더모양을 취하게 되는데, 다음으로 실린더의 양 평면을 연삭한다. 이때 두께 허용편차는 ±0.001~0.002 mm 이며, 측정방법은 그림 6(a)와 같다. 즉 렌즈의 양면 중 한 면을 우선 평판으로 가공한 후 반대 면은 첫 면과 평행한 평판으로 가공한다. 고정단추는 곡률생성기(curve generator, CG)로 작업 후에 발생하는 편심 및 기울기를 측정할 때 사용되며, 방법 (5)에서 사용한다.
- (4) 방법 (3)에 의해서 렌즈는 앞면과 뒷면이 평평하고 주변부가 거친 실린더 형상을 취하는데, 이때 센터링머신을 이용하여 매끈한 실린더 형상으로 만든다.
- (5) 다음으로 렌즈에 곡률을 생성하게 되는데, 곡률생성에는 CG를 사용한다. 널 렌즈의 곡률생성은 오목면을 우선적으로 가공하는데, 이때의 가공부위는 CG와 연삭작업(600 mesh~1200 mesh까지의 모래를 사용한 거친 연

마공정)이 연속적으로 이루어진다. 이와 같은 방법으로 제작된 렌즈의 곡률형상은 연마가공 전 1~2 μm의 형상 허용오차를 갖는다. 대량생산의 경우, 렌즈의 양면을 우선 CG 작업한 다음 연삭하는 방법을 사용하는데, 이와 같은 방법으로는 CG에 의해서 발생하는 편심과 기울기를 제거하기 어렵다.

- (6) 방법 (5)와 같은 방법으로 남은 면을 가공하게 되는데, 이때는 렌즈의 두께도 고려해야한다. 보통 연마 가공에 의해서 마모되는 정도는 각 면당 대략 10 μm인데, 제작 허용오차 ±0.01 mm를 고려하여 연마가공 전 널 렌즈의 두께는 설계 값에서 +0.03 mm 로 가공한다. 그림 6 (b)는 양면 연마 후의 널 렌즈 두께를 측정하는 장치와 그 결과를 보여준 것이다. 이때 재가공을 고려하여 렌즈의 두께는 항상 +공차로 가공한다.
- (7) 최종적으로 연마가공이 끝난 경우에는 두께뿐만 아니라 곡률과 형상도 측정해야 한다. 그림 7(b)는 간섭계를 이용하여 널 렌즈의 곡률과 형상을 측정하는 모습이다.

표 8은 널 렌즈의 측정결과(곡률, 두께, 재질)를 설계프로그램에 삽입하고 널 렌즈_2와 시험비구면 간 거리를 보상자로 사용했을 경우의 결과이다. 표 8에서 재질 'glass'는 표 6의 측정결과를 설계프로그램 CODE V의 private catalog 기능을 이용해서 정의한 값이다. 또한 표 8에서 렌즈의 곡률반경과 두께 등도 표 7의 측정결과를 인용하였다. 결과적으로 널 렌즈의 제작오차로 인한 널 광학계의 잔류수차는 RMS 0.0397λ를 갖는다.

2.3 시험비구면의 제작

우선 비구면의 종류와 특성을 소개하면 다음과 같다. 비구면의 종류는 식 (1)의 k 값에 따라 구면(k=0), 큰 타원면(k>0), 작은 타원면(0>k>-1), 포물면(k=-1), 쌍곡면(k<-1)으로 정의되고, 비구면 계수 A, B, C, D, ... 등이 추가될 경우 그 밖의 시험비구면으로 나뉜다. 그런데 구면을 제외한 나머지 시험비구면들은 측정 및 제작이 매우 어렵다. 비구면의 경우 구면과는 달리 하나의 비구면 내에 수많은 곡률들이 존재하는데, 보통 중심에서 주변부로 갈수록 구면과의 sag 값 차가 더욱 심해진다. 식 (1)에서 우변의 첫 번째 항을 sag 값이라고 한다. 이와 같은 이유로 시험비구면을 제작하거나 비구면의 곡률변경을 측정하기 위해서는 비구면 중앙부가 매우 중요한 역할을 하는데, 위의 모든 비구면상에는 정렬구경이 존재한다.^[10]

$$z = \frac{cs^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2s^2}} + As^4 + Bs^6 + Cs^8 + Ds^{10} + \dots \quad (1)$$

여기에서 c=1/r, r=반경, k=타원체 상수(conic constant), $s^2 = x^2 + y^2$, 그리고 A, B, C, D 등은 비구면계수이다.

일반적으로 시험비구면을 제작하기 위해서는 크게 두 가지 방법을 사용한다. 그 첫 번째가 수작업으로 일단 시험비구면을 구면으로 제작한 후 필요 없는 부분을 제거하는 방법이 주로 사용된다. 그 두 번째가 CNC 머신을 이용하는 방법인데, 자동화기기의 발달과 함께 그 의존도가 점차 높아지고 있는 추세이다.

그림 8은 직경 450 mm(f/2.7) 포물면경의 연마 직후 형상을 자동무수차점 방식으로 측정한 결과인데, 그림 8의 왼쪽 그림은 비구면 형상을 3차원 형태로 나타낸 것이며, 오른쪽 그림은 강도세기로 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 비구면 상에서 비대칭성이 위래 방향과 중심부가 잘 가공되지 않았음을 확인할 수 있다. 그러므로 이러한 비대칭성 등을 제거하여 완벽한 비구면으로 만들기 위해서는 본 논문에서 제시한 방법들로 측정과 제작이 반복되어야 한다. 특히 본 논문에서는 그림 8에서와 같이 골과 마루를 분리하여 편마모하는 방법으로 비구면 형상을 제작하였다.

III. 널 테스트

그림 9(a)는 직경 450 mm(f/2.7) 포물면경(시험비구면) 측정을 위해 정렬된 자동무수차점 방식 널 렌즈 실험장치의 실제 사진이다. 시험비구면 그리고 두 장의 널 렌즈들은 그림 9(b)에서 보듯이 각각 5축 자유도를 갖는 마운트에 의해 고정되어 있으며, 널 렌즈의 S1면과 S3면이 간섭계의 RTS(f/3.3)에 의해 공초점 배치 형태로 정렬하였기 때문에 널 렌즈 간 거리는 설계값을 만족한다. 즉 시험비구면 가공도중 발생할 수 있는 널 렌즈의 정렬오차를 고려하여 널 테스트 도중에 널 렌즈들을 재정렬하는 방법으로 정렬정도를 검증하였다. 널 렌즈_2로부터 시험비구면까지의 거리는 시험비구면상에 존재하는 정렬구경을 널 렌즈와 공초점 배치 방식으로 정렬하는 방법과 μm의 정도로 거리를 측정하는 선형 게이지(linear gauge)를 이용하는 방법으로 제어하였다. 이때 널 렌즈와 시험비구

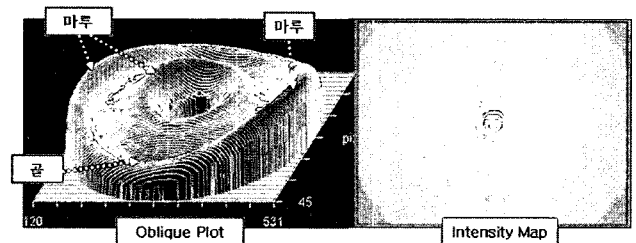
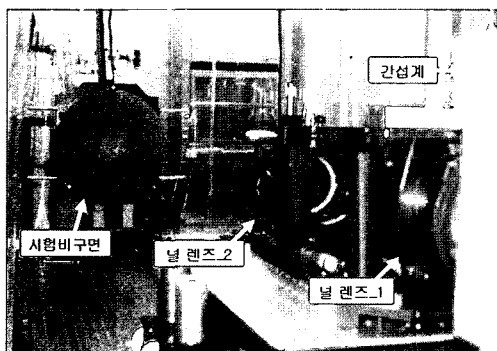
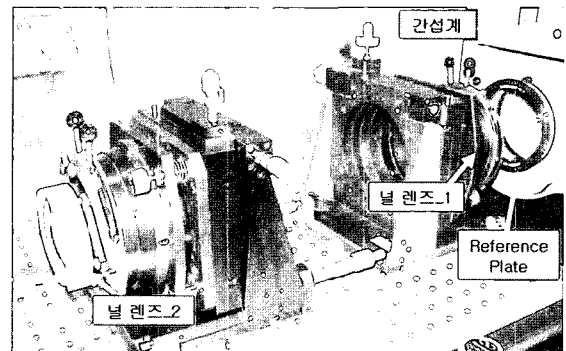


그림 8. 비구면 거울의 초기 형상.



(a)



(b)

그림 9. 자동무수차점 방식의 널 렌즈 테스트 실험장치 사진.

면 간 거리오차는 ± 2 mm 이하가 되도록 하였다. 그림 10은 자동시준방식의 널 렌즈 테스트 방법으로 직경 450 mm(f/2.7) 포물면경(시험비구면)의 측정을 위한 실험장치 사진인데, 그림

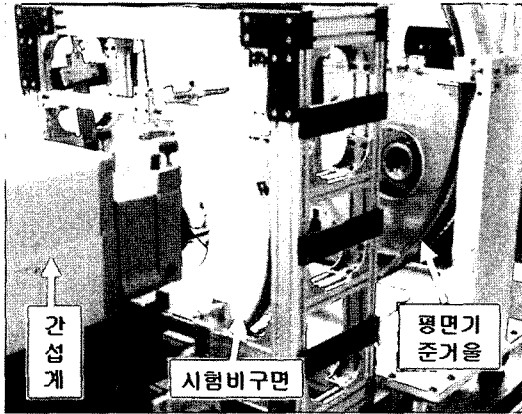


그림 10. 자동시준 방식의 널 렌즈 테스트 실험장치 사진.

에서 표기하였듯이 간섭계, 시험비구면경, 기준평면거울(reference reflection plate, p-v(1/10) λ)의 순서로 배치하였으며, 간섭계에는 RTS(f/0.75)를 사용하였다.

널 테스트의 결과를 논하기에 앞서서 우선 측정결과에 대한 신뢰성을 검증해야 한다. 보통 널 테스트의 신뢰도를 저하시키는 요소라고 하면 대략적으로 널 렌즈의 제작과 정렬 오차(표 2와 표 3) 그리고 널 렌즈와 시험비구면 간 거리 정렬오차인데, 이 요인들에 의한 시스템의 잔류 파면수차 값을 정리해 놓은 것이 표 8이다. 표 8에서 'design'은 널 렌즈 제작 후 측정 결과(표 7)에 의한 널 광학계의 잔류 파면수차 값(RTS의 파면수차 무시, 각 널 렌즈면의 형상비대칭성 무시, 시험비구면의 자유도를 보상자로 사용)이고, 'tol'은 널 렌즈 2와 시험비구면 간 거리의 오차증가량에 따른 공차를 분석한 후, 시험비구면의 형상을 보상자로 사용하여 이를 보상한 후에도 남아있는 잔류 파면수차 값이다. 결과적으로 널 렌즈와 시험비구면 간 거리에 오차가 발생하여도 비구면 형상의 변화(보상)에 의해 파면수차는 대부분 보상된다는 것을 확인

표 7. 자동무수차점방식 장치 구성 데이터 (단위 : mm) (상첨자* : 측정값, 상첨자** : 계산값).

면 번호	곡률 반경	두께	재질	비고
물체	평면	∞ (시준 빔)	-	
1	255.042*	25.005*	'glass'	
2	-227.828*	485.011*		
3	-254.974*	25.005*	'glass'	
4	-187.413*	2097.878**		
5 (시험비구면)	-2473.456, k = -1	-2097.878**	Zerodur	반사면
6	-187.413*	-25.005*	'glass'	
7	-254.974*	-485.011*	-	
8	-227.828*	-25.005*	'glass'	
9	255.042*	∞	-	
상	평면	0	-	

표 8. 자동무수차점방식의 비구면 배치에 따른 파면수차.

널 렌즈와 비구면간 거리 정렬 오차 (mm)	비구면의 곡률과 계수를 보상자로 사용할 경우		
	보상자 (비구면 형상오차)(S5면)		design / tol RMS(632.8 nm)
	Δr (mm)	$\Delta k (\times 10^{-4})$	
± 1	1.155	4.640	0.0046 λ / 0.0046 λ
± 2	2.309	9.280	0.0046 λ / 0.0046 λ
± 3	3.465	13.92	0.0046 λ / 0.0046 λ
± 4	4.619	18.56	0.0046 λ / 0.0046 λ
± 5	5.774	23.20	0.0046 λ / 0.0046 λ
± 6	6.928	27.84	0.0046 λ / 0.0046 λ
± 7	8.083	32.47	0.0046 λ / 0.0046 λ
± 8	9.238	37.11	0.0046 λ / 0.0046 λ
± 9	10.39	41.75	0.0046 λ / 0.0046 λ
± 10	11.55	46.39	0.0046 λ / 0.0046 λ

할 수 있다. 이는 널 렌즈_2와 시험비구면 간 거리 정렬정도에 의해 측정 결과에 대해 모호성이 발생하거나, 반대로 모호성을 제어할 수도 있다는 것을 의미한다.

표 9는 표 8에 의해 얻어진 오차를 갖는 각각의 비구면 형상을 자동시준방식으로 측정할 경우, 비구면 형상오차 정도에 따른 널 광학계의 잔류 파면수차 양이다. 여기에서 RTS($f/0.7$)의 초점위치로부터 시험비구면경까지의 거리를 조정인자로 사용하였는데, 실제로 시험비구면경의 위치를 mm 이하의 정밀도로 정렬하기란 매우 어렵기 때문이다. 이 표에서 특이점은 비구면 형상오차 정도에 비해서 잔류 파면수차 값이 그다지 크지 않다는 것인데, 이와 같은 측정결과는 결국 모호성을 유발할 수 있으므로 절대치로 사용할 수 없다. 그러므로 이 결과는 자동무수차점방식 널 렌즈들의 정렬정도를 검증할 목적으로 본 논문에서는 자동시준방식의 측정방법을 비교상대치 정도로만 사용하였다.

표 10은 자동무수차점방식 널 테스트에서 널 렌즈 간 정렬오차(표 3의 조건 1~4)에 따른 널 광학계의 잔류 파면수차 값이다(단, 이 경우 널 렌즈 제작 후 측정 결과를 적용하였고, RTS의 파면수차를 무시하였으며, 각 널 렌즈면의 형상비대칭성도 무시하였다). 이때 시험비구면의 5축 자유도를 조정인자로 사용하였는데, 조건1에서 조건4로 갈수록 잔류 파면수차 값이 증가함을 보인다. 그러나 정렬오차에 비해 잔류 파면수차 값 또는 민감도가 그다지 크지 않음을 확인할 수 있다.

본 논문에서 제작하려는 직경 450 mm($f/2.7$) 포물면경은

곡률반경(r)= -2473.456 mm, 비구면 계수(k)= -1 , 구경(d)= 450 mm 정도이고, 제작 허용오차로 곡률반경오차(Δr)= ± 5 mm 이하, 비구면 계수오차(Δk)= ± 0.001 이하 등의 제원을 만족하도록 한다. 제작하려는 비구면의 제작허용오차를 표 8과 비교해보면, 곡률에 비해 비구면계수가 보다 민감하다는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 제작 허용오차를 만족하기 위해서는 자동무수차점방식 널 광학계에서 널 렌즈_2와 시험비구면 간의 거리 정렬오차는 ± 2 mm 이하를 만족해야 한다. 만약 표 8과 같이 자동무수차점방식에서 널 렌즈_2와 시험비구면간 거리가 ± 2 mm 이하의 정렬오차를 만족할 경우, 제작된 시험비구면의 형상오차는 곡률오차(Δr)가 ± 2.309 mm이고, 비구면 계수오차(Δk)가 $\pm 9.280 \times 10^{-4}$ 이다. 그리고 잔류 파면수차가 RMS 0.0043 λ 인 측정 정밀도를 갖게 된다.

그림 11은 자동무수차점방식과 자동시준방식에 의해 측정된 시험비구면의 형상인데, 두 결과 모두 거의 같은꼴을 보이며, 정렬오차에 의해 생겨 날 수 있는 형상오차는 식별하기 어려울 정도로 비슷한 수치가 나온다. 그렇지만 자동무수차점 방식의 그림 3과 자동시준방식의 그림 4를 자세히 살펴보면 자동시준방식의 광경로가 자동무수차점방식의 광경로보다 약 2배가 길기 때문에 실제 파면수차는 자동무수차점방식이 자동시준방식에 비해서 2배 가량 큰 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 그림 12는 시험비구면의 최종 측정결과이며, 널 테스트에 의한 비구면 형상오차는 p - v 0.325 λ , RMS 0.036 λ 이다.

표 9. 자동시준방식에서 제작오차를 갖는 시험비구면에 의한 파면수차.

제작오차를 갖는 비구면 제원		보상자로 사용된 비구면의 이동거리 (mm)	design / tol RMS($\lambda=632.8$ nm)
Δr (mm)	$\Delta k (\times 10^{-4})$		
1.1555	4.640	0.3333	0.0 λ / 0.0022 λ
2.309	9.280	0.6666	0.0 λ / 0.0043 λ
3.465	13.92	1.000	0.0 λ / 0.0065 λ
4.619	18.56	1.333	0.0 λ / 0.0086 λ
5.774	23.20	1.666	0.0 λ / 0.0108 λ
6.928	27.84	2.000	0.0 λ / 0.0129 λ
8.083	32.47	2.333	0.0 λ / 0.0151 λ
9.238	37.11	2.666	0.0 λ / 0.0172 λ
10.39	41.75	2.999	0.0 λ / 0.0194 λ
11.55	46.39	3.333	0.0 λ / 0.0215 λ

표 10. 널 렌즈 정렬에 따른 RMS 파면수차.

보상자 오차	보상자 (시험비구면)			design / tol $\lambda(\lambda=632.8$ nm)
	z축 편심 (mm) ($\times 10^{-3}$)	x, y 편심 (mm) ($\times 10^{-1}$)	α, β 기울기 (rad)	
조건 1	4.273	4.336	0.00019	0.0046 λ / 0.0050 λ
조건 2	8.414	4.781	0.00028	0.0046 λ / 0.0055 λ
조건 3	16.83	5.577	0.00043	0.0046 λ / 0.0063 λ
조건 4	33.66	5.862	0.00071	0.0046 λ / 0.0081 λ

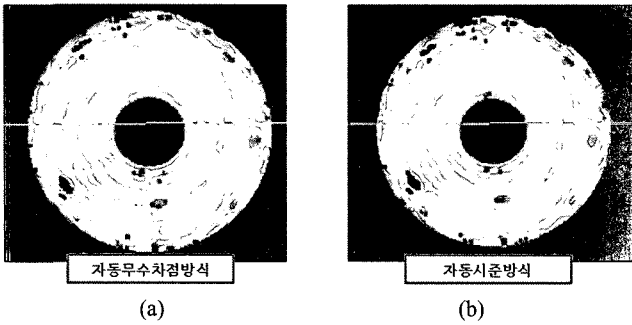


그림 11. (a) 자동무수차점 방식과 (b) 자동시준 방식의 널 렌즈 테스트 결과.

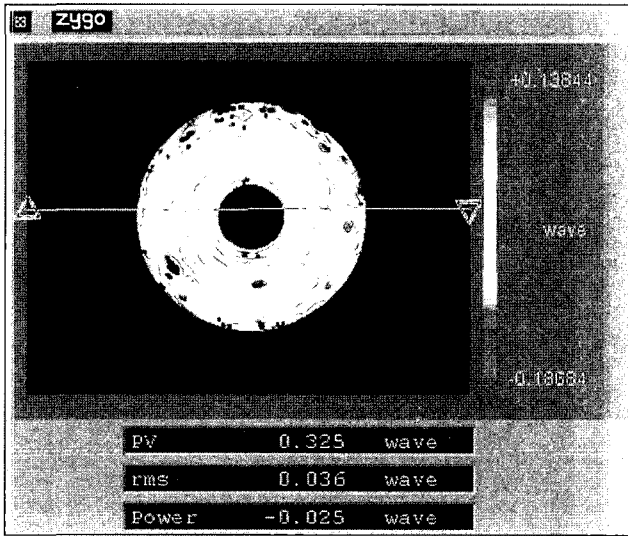


그림 12. 주경면의 최종 파면수차.

IV. 결 론

본 논문에서는 직경 450 mm(f/2.7) 포물면경 제작을 위해 자동무수차점방식의 널 광학계를 설계 및 제작하였으며, 설계프로그램(CODE V)의 공차분석기법을 이용하여 널 광학계의 제작과 정렬 오차에 따른 측정 신뢰도를 이론적으로 검증하였다. 그리고 널 광학계를 구축하여 포물면경을 제작하였으며, 자동시준방식의 측정방법으로 포물경을 재평가하여 역으로 자동무수차점방식의 널 렌즈 정렬오차에 의한 측정 신뢰도를 확인할 수 있었다. 본 논문의 결과를 정리해보면, 첫째로 측정 · 평가를 고려한 설계를 들 수 있는데, 널 광학계를 구성할 때, 널 렌즈 간 정밀 정렬이 가능하도록 널 렌즈 1면과 3면이 RTS(f/3.3)와 공심형이 되도록 설계했다. 둘째로 직경 450 mm(f/2.7) 포물면경 제작을 위한 자동무수차점방식의 이상적인 설계에 의한 잔류수차는 $RMS\ 0.0006\lambda$

이고, 널 렌즈의 제작오차(표 7의 측정결과 적용)에 의한 잔류수차(널 렌즈의 형상비대칭 포함)는 $RMS\ 0.0397\lambda$ 인데, 시험비구면 제작과정에서 널 렌즈와 시험비구면 간 거리를 $\pm 2\text{ mm}$ 이내로 제어할 경우, 이때 널 광학계에 의해 만들어지는 시험비구면은 곡률오차(Δr)가 $\pm 2.309\text{ mm}$ 이고, 비구면 계수 오차(Δk)가 $\pm 9.280 \times 10^{-4}$ 인 형상오차를 갖게 되며, 잔류수차(널 렌즈의 형상비대칭 제외)로는 $RMS\ 0.0341\lambda$ 를 갖게 된다는 것을 확인할 수 있었다. 최종적으로 포물경의 측정결과로는 형상오차 p-v 0.325λ , $RMS\ 0.036\lambda$ 를 얻었다.

참고문헌

- [1] D. Malacara, *Optical Shop Testing; 2nd Ed.* (John Wiley & Sons, New York, 1992), pp. 427-454, pp. 743-762.
- [2] 김태희, “Null CGH를 이용한 포물면경 형상 측정,” 한국광학회지, 제 13권 6호, pp.537-542, 2002.
- [3] 김연수, “비구면 측정 null 렌즈 설계 연구,” 한국과학기술원, 박사학위논문, 2001.
- [4] 김길선, 임천석 “대구경 비구면의 초정밀 가공을 위한 자동무수차점 방식의 널 렌즈 설계 및 측정 정밀도의 한계에 관한 연구,” 한국광학회지, 제 16권 1호, pp. 71-78, 2005.
- [5] 김연수, 김병윤, 이윤우, “쌍곡면 측정 null 렌즈 설계,” 한국광학회지, 제 12권 5호, pp. 352-355, 2001.
- [6] 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.
- [7] 김연수, 김병윤, 이윤우, “타원면경 측정 Null 렌즈 설계,” 한국광학회지, 제 11권 4호, pp. 246-249, 2000.
- [8] 이종용, “대구경 비구면 검사를 위한 null 광학계의 설계 및 평가 기술 연구,” 표준과학연구원 기본연구보고서, 표준과학연구원, 대전, 2002.
- [9] 이종용, “비구면 검사용 null 광학계의 설계,” 제 10회 광기술 워크샵 논문집, pp. 25-41, 2000.
- [10] 이영훈, 임천석 “조정방식과 경통고정방식에 대한 자동무수차점 널 렌즈 광학계의 측정 정밀도 한계 및 신뢰도,” 한국광학회지, 제 16권 5호, pp. 440-445, 2005.
- [11] Daniel Malacara, Brian J. Thompson, *Handbook of Optical Engineering* (Marcel Dekker, New York, 2001), pp. 446-447.
- [12] 장수, 조재홍, 응용광학 (도서출판 대응, 서울, 2003), pp. 11-17.
- [13] Schott North America, Inc., *Optical Glass : Description of Properties (Pocket Catalog: Version 1.5 e/usa)*, (Oct. 2003), pp. 7.

Fabrication, Measurement, and Evaluation of a Parabolic Mirror with the Diameter of 450 mm($f/2.7$) by Autostigmatic Null Lens System

Young Hun Lee, Jae Heung Jo[†], and Cheon Seog Rim

Department of Applied Optics and Electromagnetics, Hannam University, Daejeon 306-791, KOREA

[†]*E-mail: jhjo@hannam.ac.kr*

Yun Woo Lee, Ho Soon Yang, Jae Hyeob Lee, and In Won Lee

Photometry & Imaging Optics, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-600, KOREA

(Received December 13, 2005, Revised manuscript March 28, 2006)

The autostigmatic null lens system is designed and constructed for the fabrication of a parabolic mirror with the diameter of 450 mm($f/2.7$). And the measurement reliability is also analyzed theoretically by means of the tolerancing technique using lens design software(CODE V). From this analysis, we can precisely fabricate a parabolic mirror with the large diameter of 450 mm($f/2.7$). Meanwhile, in order to confirm the fabrication results by the autostigmatic method, the mirror surface is tested again by an autocollimating method that uses only a plane mirror without any null lens.

OCIS Codes : 120.6650, 220.1250, 220.3620, 220.4840.