

# 조정방식과 경통고정방식에 대한 자동무수차점 널 렌즈 광학계의 측정 정밀도 한계 및 신뢰도

이영훈<sup>†</sup> · 임천석

한남대학교 이과대학 광·전자물리학과

Ⓣ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

(2005년 7월 20일 받음, 2005년 10월 11일 수정본 받음)

비구면 평가를 위한 자동무수차점 널 렌즈 광학계에서, 널 렌즈간 거리를 정렬의 조정 인자로 사용하는 방식과 널 렌즈간 거리를 경통으로 고정 하는 방식에 대해 측정 정밀도의 한계 및 신뢰도를 연구하였다. 먼저 널 렌즈간 거리를 정렬의 조정 인자로 사용하는 방식에 있어서는, 널 렌즈의 제작오차에 의해 유기되는 전체 널 렌즈 광학계의 파면수차가 보상되는 특성이 나타나고 이로 말미암아 시험 비구면의 모호성(측정오차)이 발생하게 되어 측정의 신뢰도가 저하되는 결과가 초래되었다. 그리고 널 렌즈간 거리를 경통으로 고정하는 방식은, 널 렌즈계의 제작오차에 의해 유기되는 파면수차가 보상 되지 않기 때문에 측정오차가 발생하지 않았다. 즉, 이로부터 널 렌즈 광학계는 측정오차가 제거될 수 있는 경통고정방식으로 구성되어야 함을 알 수 있었다. 또, 본 연구에서는 널 렌즈와 시험 비구면간의 원거리 정렬을 제어하기 위해 시험 비구면 상에 정렬구멍이라는 개념을 제안하였고, 정렬구멍을 사용한 자동무수차점 방식의 측정 정밀도 한계도 이론적으로 분석하여 보았다.

주제어 : Autostigmatic, Null lens, Tolerance analysis, Aspherical mirror

## I. 서 론

초정밀 비구면 거울을 제작하기 위해서는 비구면 형상의 실시간 평가가 가능한 측정 장치가 필수적으로 요구된다. 다행스럽게도 비구면 형상 측정<sup>[1]</sup>에 관한 다양한 연구 결과가 이미 나와 있고, 또 계속해서 새로운 연구가 진행되고도 있다. 현재까지의 다양한 비구면 형상 측정 방법들 중 비교적 손쉽고 저가이면서 정밀도 및 신뢰도가 높은 측정법은 간섭계와 널 렌즈를 사용하는 널 시험(null test)방식<sup>[2-5]</sup>이라고 말할 수 있다. 즉, 널 시험방식의 장점으로는 시험 비구면의 표면손상이 없고 정밀측정이 가능한 광학식이라는 것과 단번의 측정으로도 시험비구면의 전면을 측정할 수 있어 측정오차의 누적이 없다는 것이다. 하지만, 이와 같은 장점에도 불구하고 널 시험방식의 측정 신뢰도는 절대적인 측정값으로 신뢰되어지지는 않았다. 이의 원인은 널 렌즈의 형상, 두께, 굴절률, 널 렌즈 간의 위치 및 편심 등에서 발생하는 오차가 측정 신뢰도에 미치는 영향 때문이다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 시험 비구면이 포물면인 경우는 환형 평면 기준거울만을 사용하는 자동기준방식의 측정 결과와 비교 참조하는 방식<sup>[9]</sup>을 취하고, 포물면이 아닌 일반적인 비구면인 경우는 독립적인 여러 방식에 의한 측정결과와 상호 비교하여 신뢰성을 검증하는 방식<sup>[2]</sup>이 현재까지의 추세였다.

본 논문에서는 대구경 비구면을 정밀하고 신뢰성 있게 측정 및 평가하기 위해, 자동무수차점(autostigmatic) 방식의 널 광학계를 수치적인 공차분석 기법으로 다루었고, 이로부터 시험 비구면의 측정 정밀도 한계를 계수화 하였다.

## II. 비구면 측정을 위한 널 렌즈광학계

널 렌즈 광학계는 그림 1과 같이 간섭계, 널 렌즈, 시험 비구면으로 구성되어 있다. 여기에서 간섭계(Interferometer)는 광원과 검출기 기능을 수행한다. 널 렌즈 광학계의 동작 원리를 설명하면 다음과 같다. 먼저, 간섭계로부터 출사된 평면파는 수차를 갖는 널 렌즈를 통과 후 비구면 파면을 형성한다. 널 렌즈의 제작과 정렬 오차를 무시할 경우, 널 렌즈를 통과한 후 광 파면은 시험비구면의 위치에서 이상적인 비구면 파면을 형성하게 되고, 이로 인해 시험 비구면에서 반사될 때 시험 비구면의 형상이 이상적이라면 입사방향과 정 반대방향으로 되돌아간다. 이때, 되 반사되어온 파면(통상, 평면파에서 이탈된 파면)과 간섭계 내의 기준파면(평면파)이 간섭하여 무늬를 만드는데, 이 간섭무늬로부터 시험 비구면의 형상을 측정할 수 있다. 표 1은 본 논문에서 사용할 널 렌즈광학계의 설계<sup>[6,7]</sup>데이터이며, 잔류 수차 값은  $2\lambda/10000$  (RMS 파면수차 기준, P-V 파면수차 :  $5.3\lambda/10000$ ) 이다<sup>[8]</sup>. 그

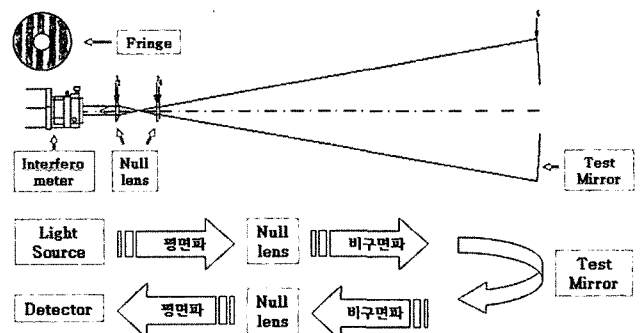


그림 1. 자동무수차점방식 널 렌즈 광학계의 구성도

<sup>†</sup>E-mail: lastwings@empal.com

표 1. 자동무수차점 방식의 장치 구성 데이터 (단위 : mm)

면 번호	곡률 반경	두께	재질	구경크기
물체	평면	$\infty$ (시준 빔)	-	-
1(stop)	평면	10	BK7	20.0
2	-34.957	109.97		20.0
3	$\infty$	10	BK7	15.33
4	-138.307	1132.45		17.38
5 (회전 대칭형 시험 비구면)	-1191.95 K = -1.133392	-1132.45	반사	300.0
6	-138.307	-10	BK7	17.38
7	평면	-109.97	-	15.33
8	-34.957	-10	BK7	20.0
9	평면	$\infty$	-	20.0
상	평면	0	-	-

리고 표 1의 데이터로부터 알 수 있듯이 널 렌즈는 총 2개로 구성되어 있고, 형상은 모두 평-볼록이다. 참고로 평-볼록 렌즈의 경우 양-볼록 렌즈에 비해 정밀가공이 용이함을 밝혀두고자 한다.

### III. 비구면의 형상측정 방법

비구면 거울을 제작하기 위해서는 비구면 형상의 실시간 측정이 가능한 측정 장치가 필수적이고, 제작된 비구면 거울의 정밀도는 측정 장치의 분해능(측정한계)에 의해 좌우된다. 통상 대구경 비구면의 경우, 장치의 구성이 간단하고 정밀한 측정이 가능한 널 렌즈 방식이 주로 채용되는데, 측정 정밀도의 한계는 널 렌즈의 제작 정밀도와 널 렌즈 간 또는 널 렌즈와 비구면 간의 정렬 정밀도에 의해 결정 된다. 여기서 설계에 의한 널 렌즈 광학계의 전체 파면수차 값은 일반적으로 거의 무시할 수 있을 정도로 작은 값(일반적으로, P-V 값 기준:  $\lambda/1000$ )이기 때문에 측정 정밀도의 한계에 영향을 끼치지 않는다는 것을 밝혀두고자 한다.

즉, 신뢰할 수 있는 측정 정밀도의 한계를 제시하기 위해서는 널 렌즈 광학계의 설계 값에서 제작 및 정렬 오차가 발생 될 때의 파면수차 변화가 고려되어야만 한다. 이를 위해 본 절에서는 정렬오차를 효과적으로 제어할 수 있는 방안에 대해서 살펴본다.

#### 3.1 널 렌즈간 거리를 정렬의 조정 인자로 사용하는 형상 측정

그림 2 ~ 5는 널 렌즈간 거리를 정렬의 조정 인자로 사용하는 경우, 정렬 순서 및 측정 방법에 관해 설명하고 있다. 우선 그림 2와 같이 간섭계에 구면파를 생성하는 모듈(Reference Transmission Sphere, RTS)을 장착시켜 초점을 맺게 한 후 시험 비구면의 가장자리 부분으로 입사시킨다. 입사된

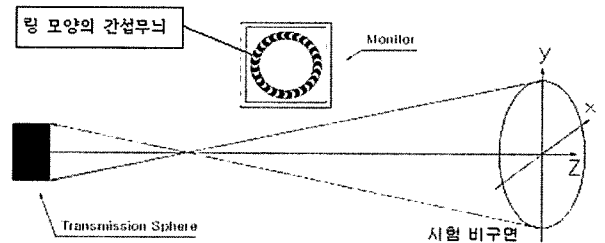


그림 2. 시험 비구면의 정렬.

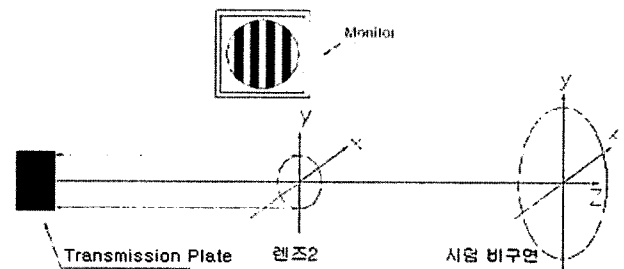


그림 3. 널 렌즈2의 정렬.

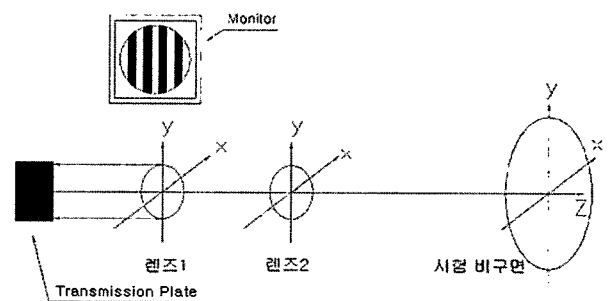


그림 4. 널 렌즈1의 정렬.

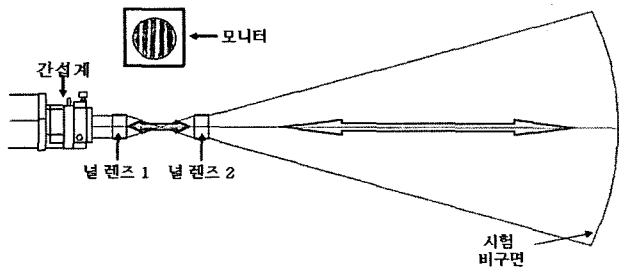


그림 5. 널 렌즈간 거리를 정렬의 조정 인자로 사용한 비구면 형상측정방법.

빔은 온 경로와 반대 방향으로 재-반사되도록 시험 비구면의 대략적인 광축방향 위치 및 기울기를 조절하게 되는데, 기울기의 조절이 정확하게 되면 원형의 간섭무늬가 생긴다. 즉, 이것은 간섭계와 시험비구면의 광축이 일치됨을 의미한다. 만약, 원형과 같은 대칭적인 간섭무늬가 발생하지 않으면 시험 비구면이 기울어져 있다는 것이므로 간섭무늬를 모니터로 관찰하면서 원 모양이 되도록 시험 비구면의 위치 및 기울기를 조정해야 한다. 다음으로, RTS를 그림 3과 같이 정밀한 광학평면(Reference Transmission Plate, RTP)으로 교체한 후, 널 렌즈 2를 정렬한다. 이때 널 렌즈 2와 시험 비구면의 거리는 정렬의 편리를 위해 설계 값에 대략  $\pm 5 \text{ mm}$  이내를 유지하도록 한다. 만약, 널 렌즈 2가 기울기를 거의 갖지 않는다면 그림 3과 같이 간섭계의 모니터 상에서 단지 몇 개의 직선무늬만 관측된다(파면수차 :  $\lambda/20$ 에 대응). 널 렌즈 1도 널 렌즈 2와 같은 방법으로 정렬되는데, RTP를 널 렌즈 2와 공유하면서 널 렌즈 1의 정렬오차를 널 렌즈 2와 같이 설계 값에서 대략  $\pm 5 \text{ mm}$  이내로 유지한다. 역시 이때에도 널 렌즈 1이 약간의 기울기만을 갖는다면 그림 4와 같이 모니터로 몇 개의 직선무늬만이 확인된다. 여기까지가 널 렌즈간 거리를 조정 인자로 사용하는 자동 무수차점 방식의 1차적인 정렬 순서이다. 최종적으로 널 렌즈와 시험비구면의 정밀한 위치 조정은 널 렌즈 1과 시험 비구면을 광축방향(z 방향) 및 x, y 방향(편심조정)으로 움직여 가면서 가장 작은 파면수차 값이 얻어지도록 시행착오(trial and error) 방식으로 수행된

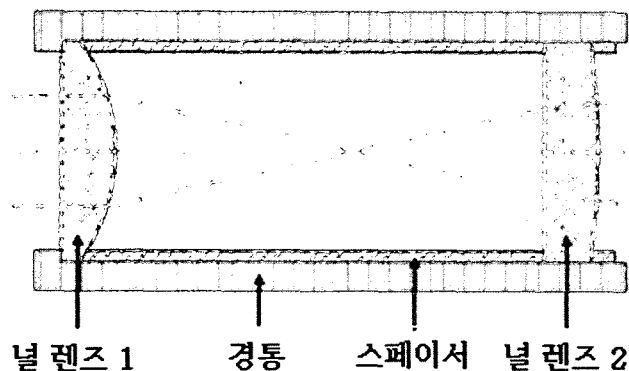


그림 6. 널 렌즈와 경통.

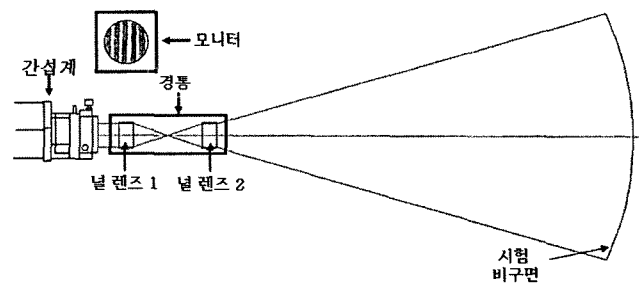


그림 7. 널 렌즈간 거리를 경통으로 고정하는 측정방식.

다(그림 5 참조). 이때 유의할 점은, 시험 비구면이 광축방향으로 조정되면서 전체적인 정렬의 보상자로서 기울기도 동시에 조정된다는 것이다. 정렬이 완료되면 그림 5에서와 같이 파면수차  $\lambda/20$ 에 대응되는 간섭무늬가 나타나게 된다.

### 3.2 널 렌즈간 거리를 경통으로 고정하는 형상 측정

널 렌즈간 거리를 경통으로 고정하는 측정방법의 경우는 3.1절의 측정방법(널 렌즈 조정방식)에 비해 상대적으로 정렬이 간단하다. 3.1절의 측정방법은 정렬 시 널 렌즈와 시험 비구면 모두를 광축방향으로 조정해야 할 뿐 만 아니라 동시에 편심 및 기울기도 조정해야 하는 번거로움이 있었다. 하지만, 본 절에서와 같이 경통을 사용하는 방법의 경우 널 렌즈간 거리 및 편심/기울기오차는 그림 6과 같이 경통의 제작 정도 및 간격 링(spacer)에 의해 결정된다. 만약, 경통이 정밀하게 제작되어서 경통과 시험 비구면 간의 광축 및 편심 조정, 그리고 시험 비구면의 기울기 조정 만에 의해 정렬이 완료될 수 있다면, 3.1 절의 방법보다 훨씬 간편하고 신속한 측정방법이 될 것이다. 경통의 제작 정도에 관한 정량적인 자세한 계산은 향후 5절에서 논의할 예정이다.

## IV. 정렬 구경의 도입

그림 8과 같이 널 렌즈를 통과 한 직후의 파면 형상은 원추곡면계수가 약 -17.49의 비구면 파면을 취하며, 설계위치에서는 시험 비구면의 원추곡면계수 값이 -1.1335를 갖게 된다. 이 비구면 파면과 일치하도록 시험 비구면이 제작되는데, 그 과정은 지속적이고 반복적인 측정과 제작과정을 거쳐 만들어진다. 이때 비구면 파면의 측정 기준이 되는 기준 파면이 필수적으로 필요한데, 기준 파면은 정렬을 위해 비구면 상에서 만들어 져야 하며 구면파면이 되어야 한다. 이런 이유로 본 논문에서는 시험 비구면 상에 정렬구경이라는 개념

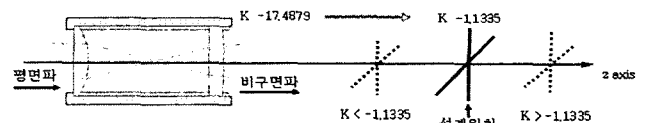


그림 8. 널 렌즈를 통과 후 광파면의 변화.

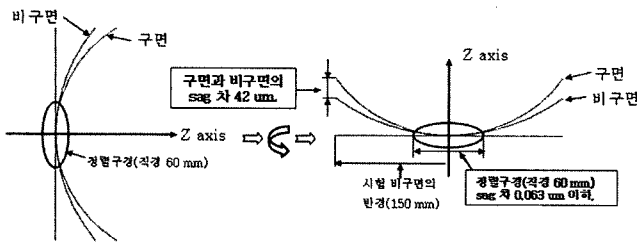


그림 9. 정렬구경.

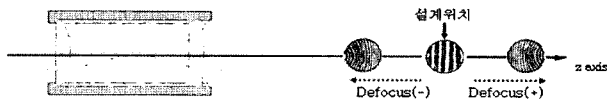


그림 10. 시험 비구면의 위치에 따른 정렬구경에서의 간섭무늬 변화.

을 도입한다.

본 논문에서 정의하고자 하는 정렬구경이란 구면과 비구면의 곡면형상 차(그림 9의 sag 값 차)가 무시할 수 있을 정도로 작아 구면으로 간주할 수 있는 비구면 상의 영역을 말한다. 즉, 정의에 의해 시험 비구면의 정렬구경을 60 mm 로 정하였는데, 이때 정렬구경 내에서의 sag 값 차는 63 nm 이하가 된다(즉, 정렬구경 내를 구면으로 간주해도 무방하다). 정렬구경의 용도는 그림 10과 같이 시험 비구면을 설계 위치로 정확하게 배치시키고자 하는데 있으므로, 정렬구경의 제작 정도는 세심하게 고려되어야 한다. 통상 모든 제작은 오차를 갖기 마련이므로, 정렬구경의 제작 오차 역시 정렬의 오차로 직결되고, 또한 이는 비구면의 제작 형상오차로 귀결된다. 그러므로 본 연구에서는 시험 비구면을 정확한 설계 위치로 정렬시키기 위해 최대한도로 허용되는 정렬구경의 제작오차에 대해 살펴보고자 한다. 표 2는 제작오차를 갖는 정렬구경 ( $\Delta R$ )을 이용하여 경통에 고정된 널 렌즈와 시험 비구면을 정렬하는 경우, 시험 비구면에 발생할 수 있는 측정 형상의 모호성(비구면 형상오차,  $\Delta k$ )에 대한 계산결과이다. 즉, 시험 비

구면의 형상이 보상자로서 작용하기 때문에 전체 널 렌즈 광학계의 수차는 실제 시험 비구면의 형상오차와 무관하게 보상된다는 것이다. 예를 들면, 표 2에서 정렬구경의 형상오차가  $1\lambda$ ( $\Delta R=1.998$  mm)인 경우, 시험비구면의 제작형상오차가  $\lambda/4$ 가 되더라도 널 렌즈(경통)와 시험 비구면간의 거리( $\Delta T_2$ )이동에 의해(2.307 mm) 전체 널 렌즈 광학계의 파면수차 값은 0.0002 $\lambda$ 라는 것이다. 결과적으로, 시험 비구면의 형상 정밀도가  $\lambda/4$  이하가 되기 위해서는,  $1\lambda$  이하의 정렬구경의 제작오차가 필요함을 알 수 있다.

### V. 조정방식과 경통고정방식 널 렌즈에 대한 측정 정밀도 한계 및 신뢰도

널 렌즈의 제작 및 측정 장치의 정렬이 완전하다면(설계치와 동일하다면), 측정 정밀도의 한계는 전체 널 렌즈 광학계의 잔류 수차 값과 동일할 것이다. 즉, 2절에서 제시된 바와 같이 본 논문에서 널 렌즈 광학계의 잔류 수차 값은  $2\lambda/10000$ (RMS 파면수차 기준임, P-V 파면수차 :  $5.3\lambda/10000$ )이므로 측정 정밀도의 한계도  $2\lambda/10000$  가 된다. 그러나 오차를 가지고 제작된 널 렌즈로 시험 비구면을 평가할 때는, 측정 정밀도의 한계를  $2\lambda/10000$  까지 얻을 수 없다. 언급한 바와 같이 크게 두 가지 요인에 의해서 측정 정밀도는 저하하게 되는데, 바로 널 렌즈의 제작오차와 널 렌즈의 정렬 정밀도이다.

한편, 널 렌즈의 두께, 곡률반경, 굴절률 등의 제작오차가 발생할지라도, 널 렌즈간의 거리와 널 렌즈와 비구면 간의 거리 조정에 의해 전체 널 렌즈 광학계의 파면수차가 보정될 수 있는데, 앞에서 설명한 대로 이것은 바로 3.1과 같은 측정 방식(널 렌즈 조정방식)이다. 반면, 널 렌즈간 거리를 경통으로 고정하는 경우, 경통 제작오차로 인해 측정 정밀도는 저하될 수 있다(3.2절의 측정방법). 표 3 및 표 4에 널 렌즈 제작 오차와 경통에 의해서 널 렌즈에 유기되는 오차를 제시해 놓았다. 표 3, 4는 본 논문에서 측정 정밀도의 한계를 계산하기 위한 기초 자료로 사용된다.

표 2. 정렬구경의 형상오차와 널 렌즈계의 RMS 파면수차 (■의 sag 값은 비구면의 가장자리를 기준한 값)

정렬구경의 형상 오차		시험 비구면의 위치만을 보상자로 사용하는 경우		시험 비구면의 위치와 원추곡면계수 둘 다를 보상자로 사용하는 경우			
$\Delta R$ (mm)	sag ( $\lambda$ )	$\Delta T_2$ (mm)	RMS 파면수차 ( $\lambda$ )	$\Delta k$		$\Delta T_2$ (mm)	RMS 파면수차 ( $\lambda$ )
				숫자	sag (mm)■		
0.000	0.0	0.000	0.000	0.000	0.00000	0.000	0.0002
0.999	0.5	1.174	0.032	0.004	0.00029	1.153	0.0002
1.998	1.0	2.348	0.065	0.008	0.00059	2.307	0.0002
2.997	1.5	3.522	0.097	0.013	0.00096	3.460	0.0002
3.996	2.0	4.696	0.129	0.017	0.00126	4.614	0.0002
4.995	2.5	5.871	0.162	0.021	0.00156	5.767	0.0003
5.994	3.0	7.045	0.194	0.023	0.00171	6.936	0.0229

표 3. 널 렌즈의 제작오차

렌즈 렌즈오차	널 렌즈 1		널 렌즈 2	
	앞면 (평면)	뒷면	앞면 (평면)	뒷면
곡률반경(fringe)	±0.1	±1.0	±0.1	±1.0
형상비대칭(fringe)	±0.1	±0.2	±0.1	±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 5, 6은 표 3, 4의 오차가 널 렌즈계에 발생한 경우, 개개 오차(수차발생량)에 의한 전체 널 렌즈 광학계의 성능 변화(수차 발생)를 정리해 놓은 것이다. 여기서 유의할 점은 발생된 수차량들이 널 렌즈 간 혹은 널 렌즈와 비구면 간의 미세 조정을 고려하지 않았다는 것이다. 즉, 표 5, 6의 수차 발생량들은 비교적 큰 값을 가지는데, 이것은 널 렌즈가 미세 조정되지 않고 설계위치로만 놓여져 있기 때문에 나타나는 현상이라는 것이다.

표 5, 6의 데이터가 가지는 의미는 정렬을 위한 미세조정 전에 각 오차에 의한 수차 발생량을 살펴봄으로써 각 오차별 수차민감도를 파악하는 것이다.

표 7, 8은 널 렌즈의 광축 방향 위치와 편심 및 기울기를 보상자(파면수차 감소를 위한 미세조정)로 두었을 때의 파면 수차 변화량이다(3.1 절의 측정법). 이를 표 5, 6과 비교해보면 주목할 만 한 점이 나타나는데, 그 특징은 형상비대칭(irregularity)을 제외한 나머지 모든 제작오차들은 미세조정 에 의해 파면수차가 보정된다는 것이다. 결과적으로, 널 렌즈 간 위치와 편심 그리고 기울기를 보상자로 사용할 경우, 형상비대칭을 제외한 모든 널 렌즈 제작오차가 보상되므로 측정 정밀도의 한계는 형상비대칭에 의한 파면수차의 총 기여분인 0.0316λ(총 RMS 파면수차)로 주어지게 된다. 단, 여기서 시험 비구면의 형상 오차가 측정 정밀도에 미치는 영향은 이후의 논의(표 11과 표 12)에서 다루기로 한다.

표 9, 10은 2매의 널 렌즈를 경통으로 고정하고 측정 비구면의 광축 방향 위치와 편심 및 기울기를 보상자(파면수차 감소를 위한 미세조정)로 두었을 때의 파면수차 변화량이다(3.2 절의 측정법). 표 7, 8과 비교해보면 경통제작으로 인한 오차 인자의 증가와 보상자의 감소에도 불구하고 파면 수차의 증가량이 미미하다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 경통고정 방식의 경우 제작 및 정렬에 의해서 발생할 수 있는 총 RMS 파면 수차는 0.0326λ인데, 이것은 앞의 널 렌즈 조정방식의 결과(0.0316λ)와 비슷한 값을 보여준다. 결과적으로, 측정 정밀도의 한계라는 측면에서 보면 두 방식의 결과는 거의 대동 소이한 한계 정밀도를 갖게 됨을 알 수 있다. 여기서도 시험 비구면의 형상 오차가 측정 정밀도에 미치는 영향은 고려하

지 않았고, 마찬가지로 이후의 표 11과 표 12에서 논의하기로 한다.

표 11은 시험 비구면의 형상측정에 있어서의 모호성을 검증하기 위해 시험 비구면에 비구면 형상오차(Δk)를 주어, 전체 널 렌즈 광학계의 잔류수차가 보정되는 정도를 살펴본 것이다. 단, 널 렌즈의 제작오차는 무시하고 널 렌즈간 거리(ΔT1)와 널 렌즈와 시험 비구면간 거리(ΔT2)를 미세 조정의 인자로 사용했다. 표 11에서 주목할 만 한 점은, 시험 비구면의 형상오차가 증가함에도 불구하고 미세조정 인자들(ΔT1, ΔT2)의 움직임 폭의 증가에 의해 널 렌즈 광학계의 파면수차가 보상되어 지는 것이다. 즉, 이로부터 결론지을 수 있는 것은 3.1절의 측정법(널 렌즈 조정방식)이 시험 비구면의 형상 오차에 있어서 측정의 모호성을 유발시킨다는 것이다. 한편, 표 12와 같이 널 렌즈간 거리를 경통으로 구속하는 3.2절의 측정 법은, 미세조정 인자 ΔT2를 변화시켜도 널 렌즈 광학계의 파면 수차가 보상되기는커녕 오히려 증가함을 보인다. 이로부터 알 수 있는 중요한 결론은, 경통고정방식이 널 렌즈 조정방식과 거의 대등한 측정 정밀도를 가지면서, 측정 조작은 오히려 간편하고 또한 측정 신뢰도도 확보할 수 있다는 것이다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 비구면 평가를 위한 자동무수차점 널 렌즈 광학계에서 널 렌즈간 거리를 정렬의 조정 인자로 사용하는 측정방식과 널 렌즈간 거리를 경통으로 고정하는 측정방식에 대해 측정 정밀도의 한계 및 신뢰도를 연구하였다. 본 논문에서 논의된 결과들을 정리해 보면, 널 렌즈 조정방식과 경통고정방식은 거의 대등한 측정 정밀도를 가지는데(0.0316 λ vs. 0.0326λ) 측정 조작의 간편성 및 측정 신뢰도는 경통고정방식이 훨씬 우월하다는 것이다. 즉, 널 렌즈 광학계는 경통고정방식으로 측정이 이루어져야 함을 알 수 있었다. 그리고 널 렌즈 광학계를 정렬하고자 할 때, 필수적으로 필요한 기준구면을 시험 비구면 상에 정렬구경이라는 개념으로 도입 및 정의하였고, 더 나아가 이의 요구되는 제작정도를 수치적으로 정확히 규명한 것도 본 연구의 성과로 생각된다.

## 참고문헌

- [1] D. Malacara, *Optical Shop Testing*, 2nd Ed., Chapter 12. Null Tests Using Compensators A. Offner and D. Malacara, Appendix 1. An Optical Surface and Its Characteristics, Appendix 2. Some Useful Null Testing Configurations.
- [2] 김연수, "비구면 측정 null 렌즈 설계 연구," 한국과학기술원, 박사학위논문, 2001.
- [3] 김연수, 김병윤, 이윤우, "쌍곡면 측정 null 렌즈 설계," 한국광학회지, 제 12권 5호, pp. 352-355, 2001.
- [4] 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.
- [5] 김연수, 김병윤, 이윤우, “타원면경 측정 Null 렌즈 설계,” 한국광학회지, 제 11권 4호, pp. 246-249, 2000.
- [6] 이종웅, “비구면 검사용 null 광학계의 설계,” 제 10회 광기술 워크샵 논문집, pp. 25-41, 2000.
- [7] 이종웅, “대구경 비구면 검사를 위한 null 광학계의 설계 및 평가 기술 연구,” 표준과학연구원 기본연구보고서, 표준과학연구원, 대전, 2002.
- [8] 김길선, “대구경 비구면의 초정밀 가공을 위한 자동무수차점 방식의 널 렌즈 설계 및 측정 정밀도의 한계에 관한 연구,” 한국광학회지, 제 16권 1호, pp. 71~78, 2005.
- [9] 김태희, “Null CGH를 이용한 포물면경 형상 측정 Null computer generated hologram test for measurement of parabolic mirror,” 한국광학회지, 제 13권 6호, pp. 537-542, 2002.

## A Study for the Limitation of Measurement Accuracy and Reliability of Autostigmatic Null lens System by Adjustment and Fixing Process

Young Hun Lee<sup>†</sup> and Choen Seog Rim

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

<sup>†</sup>*E-mail: lastwings@empal.com*

(Received July 20, 2005, Revised manuscript October 11, 2005)

The limitation of measurement accuracy and reliability of autostigmatic null lens system are studied for the cases of using inter-distance of null lenses as the adjustment factor of alignment and fixing the distance by mounting. If we investigate the first case, the wavefront aberration of null lens system is compensated by the adjustment process even though the shape of aspherical surface is not properly fabricated. As the result, it brings about the problem of measurement reliability. However, for the fixing process by mounting null lenses, it doesn't cause the reliability problem because the wavefront aberration of null lens system is not compensated. Further, the fixing process shows nearly same result in measurement accuracy to the adjustment process, that is,  $0.0316\lambda$  vs.  $0.0326\lambda$ . So, we can conclude the setup for autostigmatic null lens system must be constituted by means of the fixing process. Meanwhile, we introduce and define the alignment aperture on aspherical mirror, which can be approximated as spherical zone for alignment of null lens system, and besides, we calculate the required fabrication accuracy of the zone for the necessary measurement accuracy.

OCIS Codes : 120.6650, 220.1250, 220.3620, 220.4840.