

## 경통고정식 자동무수차점 널 렌즈 테스트법을 이용한 직경 300 mm(f/1.98) 알루미늄 쌍곡면 거울의 형상측정

이영훈 · 조재홍<sup>†</sup> · 임천석

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

양순철 · 김건희

한국기초과학지원연구원, 초정밀가공팀  
Ⓣ 305-333 대전광역시 유성구 어은동 52번지

원종호

충남대학교 공과대학 기계공학과  
Ⓣ 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220번지

정연홍

경동대학교 안경광학과  
Ⓣ 219-832 강원도 고성군 토성면 봉포리 산 91-1

(2005년 12월 23일 받음, 2006년 9월 4일 수정본 받음)

초정밀 비구면 가공기로 제작한 구경 300 mm이고 f-수가 1.98인 알루미늄 쌍곡면 거울의 형상을 측정하기 위하여 자동무수차점 널(null) 렌즈 광학계를 설계하고 제작하였으며, 이를 이용하여 이 대구경 쌍곡면 거울의 형상을 측정하였다. 이때 널 렌즈간 정렬은 구조적으로 안정하고 부피가 작은 경통고정식을 선택하였고, 널 렌즈 및 경통의 제작 허용오차는 요구되는 측정 정밀도를 만족하도록 공차분석기법을 통하여 계산하고 제작하였다.

주제어 : Lens module, Null lens, Aspherical mirror, Diamond turning machine.

### I 서 론

국내외적으로 위성카메라, 광집속기, 노광광학계 등에 사용하는 직경 수십 cm부터 수 m의 대구경 반사경에 사용하는 비구면 형상의 설계 및 가공기술, 그리고 형상측정기술에 대한 연구가 지속적으로 있어왔다. 보통 초정밀 비구면이라 하면 형상정밀도가 대략 면의 최대 피크와 최소 골 사이의 값인 P-V(peak to valley)가  $\lambda/10$ ( $\lambda=632.8$  nm) 이하인 비구면을 말한다.<sup>[1]</sup> 이러한 비구면 설계 및 제작기술은 초정밀 가공기술의 발달로 인하여 실질적인 산업화가 가능하였으며, 이로 인하여 결상광학계의 고성능화 및 경박단소화가 비약적으로 이루어지게 되었다.

대표적인 비구면 형상측정 장비로는 접촉식 장비인 Form Talysurf와 같은 profiler가 있으며, 비접촉식 장비로는 UA3P(Ultrahigh Accurate 3-D Profilometer)와 Zygo사에서 판매하는 간섭계가 있다. 여기서 Form Talysurf의 정밀도(최대 이동거리)는 0.5  $\mu\text{m}$ (120 mm) 또는 0.2  $\mu\text{m}$ (20 mm)이며, 데이터 분해능(data resolution)은 0.25  $\mu\text{m}$ 이며, standard stylus의 반

경은 1.5  $\mu\text{m}$ 에서 2.5  $\mu\text{m}$ 이다. 그러나 이 장치로는 검사하는 피검면의 형상을 대략적으로 측정할 수 있으므로 직경 300 mm인 피검면의 전체적인 형상비대칭성을 측정하기에는 적합하지 못하다. UA3P의 경우도 대구경 비구면의 전체면적을 측정하는데 측정정확도가 떨어지는 단점이 있다. 그러나 간섭계와 널 광학계를 이용하는 널 테스트의 경우, 피검면의 크기에 제한이 없고 비교적 단시간 내에 측정이 가능하며 측정정밀도가 가장 높다.<sup>[2-4]</sup>

이와 같은 이유로 비구면 형상의 정밀측정에는 간섭계와 널 렌즈들을 이용한 널 테스트가 일반적으로 사용된다. 여기서 말하는 널 테스트는 간섭계로부터 기준 구면파 또는 평면파가 널 광학계를 통과 후 설계상의 위치에서 시험 비구면과 반사 후, 입사방향과 정 반대방향으로 되돌아온, 수차를 갖는 파면(통상, 평면파 또는 구면파에서 이탈된 파면)과 간섭계 내의 기준파면이 간섭하여 무늬를 만드는데, 이 간섭무늬로부터 시험 비구면의 형상을 측정하는 방법이다.<sup>[5,6]</sup>

본 논문에서는 이미 앞서 발표한 참고문헌 [5]와 [6]에서 이론적으로 설계하고 그 측정정밀도의 한계를 살펴보았던 대구경 비구면의 초정밀 가공을 위한 자동무수차점 방식들 중 정렬과정과 널 렌즈의 고정방법이 어려운 경통고정방식

<sup>†</sup> E-mail: jhjo@hannam.ac.kr

의 널 렌즈를 실제로 제작하여 조립하는 방법을 제안하고자 한다. 또한 이 방법을 이용하여 직경 300 mm의 쌍곡면 비구면 거울의 형상을 실제로 측정하고자 한다. 여기에서 자동무수차점 방식의 널 렌즈 테스트법은 검사할 광학계의 크기가 커져도 널 렌즈 제작에 사용되는 비용과 시간이 크게 증가하지 않는다는 장점이 있으나 널 렌즈의 제작 및 정렬이 어렵다는 단점이 있다.<sup>[7]</sup> 특히 자동무수차점 방식의 널 렌즈 테스트법에서 널 렌즈를 경통에 고정하는 경통고정식 방식은 그 조립과정이 매우 어렵지만 기계적으로 환경의 변화에 매우 강한 구조를 갖는 널 렌즈 방식이기 때문에 매우 실질적인 방법이다.

### II. 자동무수차점방식의 널 광학계 설계

자동무수차점방식 널 렌즈 광학계는 간섭계의 시준광속(collimated beam)을 광원으로 이용하는데, 간섭계를 제외할 경우 무초점계(afocal system)라 볼 수 있다. 이와 같은 널 광학계의 특징은 간섭계의 시준광속만을 광원(물체)으로 사용하기에 광학계의 시야각(field of view, fov)이 0이 된다. 그리고 무한거리의 광원을 이용하는 널 광학계의 경우, 간섭계로부터 널 렌즈 모듈 간 거리 정렬이 매우 용이하다는 장점이 있다.

그림 1은 자동무수차점방식 널 렌즈 광학계의 개략도이며, 이 광학계는 간섭계, 널 렌즈 모듈, 시험 비구면의 순으로 구성되어 있다. 널 광학계에서 간섭계는 광원과 검출기 기능을 수행하며, 널 렌즈 모듈은 간섭계로부터 생성된 구면파 또는

평면파를 설계상의 위치에서 이상적인 비구면파로 변형시키는 역할을 수행한다. 널 광학계의 설계시 고려하는 파장은 간섭계의 광원인 He-Ne 레이저의 파장  $\lambda = 632.8$  nm이다.

평면파 또는 구면파가 널 렌즈를 통과하여 나온 파면이 측정하고자 하는 비구면의 형태와 같아지도록 널 광학계를 설계한다. 보통 1매의 구면렌즈로도 비구면 파면을 생성할 수 있지만, 본 논문에서는 광학계의 설계요구사항(측정 정밀도 P-V(peak to valley)값으로  $1/10 \sim 1/20 \lambda$ )을 만족시키기 위해 참고문헌 [5]와 같이 2매의 평볼록렌즈(널 렌즈1과 널 렌즈2)를 사용하였다. 여기서 평볼록렌즈의 형태로 설계 및 제작을 한 이유는 양오목 또는 양볼록 렌즈제작에 비해서 가공이 보다 용이하기 때문이다.

널 광학계의 설계에서 측정시 정렬관계로 인하여 입사동의 구경크기를 적절하게 설정해야 한다. 널 렌즈는 제작과 동시에 간섭계의 RTS(reference testing sphere)를 사용하여 널 렌즈의 파면을 측정한다. 이 경우 RTS의  $f$ -수(유효초점거리와 입사동 직경의 비)를 고려하여 제작하려는 널 렌즈의  $f$ -수를 설계해야만 한다. 본 논문에서는 제작과 측정의 용이성을 고려하여 입사동의 직경을 20 mm로 설정하였다. 또한 널 렌즈 1의 EFL(effective focal length)과 널 렌즈1과 널 렌즈2 간 거리를 제한하여 널 렌즈2의 유효구경도 정하였다. 이때 널 렌즈들의 두께는 모두 10 mm로 설정하였다.

표 1은 시험 비구면 거울을 포함한 자동무수차점방식 널 광학계에 대한 설계 데이터로 곡률반경, 두께, 굴절률, 구경을 mm 단위로 정리해 놓은 것이다. 이 설계 데이터에 의한

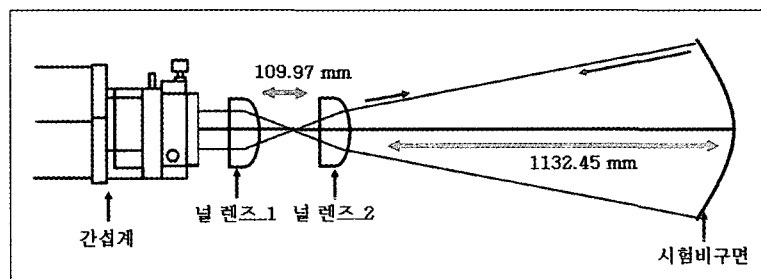


그림 1. 자동무수차점방식 널 렌즈 광학계의 개략도.

표1. 자동무수차점방식 널 광학계의 설계 데이터(단위 : mm).

각 면	곡률반경(mm)		두께(mm)	재질	구경(mm)
물체	$\infty$		$\infty$	-	-
1(스톱)	널 렌즈1	평면	10	BK7	20.0
2		-34.957	109.97	-	20.0
3	널 렌즈2	평면	10	BK7	15.33
4		-138.307	1132.45	-	17.38
5 (시험비구면 거울)	-1191.95 $k = -1.1335$		-1132.45	-	300.0
6	널 렌즈2	-138.307	-10	BK7	17.38
7		평면	-109.97	-	15.33
8	널 렌즈1	-34.957	-10	BK7	20.0
9		평면	$\infty$	-	20.0
상면	$\infty$		0	-	-

렌즈 설계프로그램인 CODE V를 사용하여 널 광학계의 잔류 파면수차를 계산한 결과, RMS(root mean square) 잔류 파면수차는 0.002 λ이다.

### III. 널 렌즈와 경통의 제작

널 렌즈를 이용한 비구면 측정결과와 널 렌즈의 제작오차와 정렬오차가 측정결과에 미치는 영향 크기 때문에 널 렌즈를 이용한 널 테스트의 결과는 절대적인 측정값으로 잘 사용하지 않는다. 그러나 직경 1 m 이상인 대구경 광학계에서는 그 제작 기간 및 비용문제로 널 렌즈를 이용한 비구면 측정법이 사용되기 때문에 이 경우 널 렌즈의 제작정도와 널 렌

즈를 고정하는 경통의 제작정도는 제작허용오차 범위를 벗어나지 않도록 해야만 한다.

그림 2는 제작된 널 렌즈를 WYKO 간섭계(Veeco, WYKO 6000)로 측정 결과를 정리한 것이다. 이 그림에서 왼쪽은 1면의 결과이고, 오른쪽은 2면의 결과이다. 그리고 위의 사진들은 간섭무늬의 사진이며, 중간 사진은 파면수차량을 색으로 나타낸 것이고, 맨 아래쪽 그림은 파면수차를 3차원으로 보여주는 그래프이다. 이 결과들을 설계값 및 공차와 더불어 정리한 것이 표 2이다. 즉 표 2는 널 렌즈의 1면과 2면 및 두께에 대한 곡률과 각 면들의 최대 P-V값과 RMS값을 보여준다. 결과적으로 제작된 널 렌즈는 면형상(형상비대칭) 그리고 곡률반경이 제작허용오차를 만족하는 것을 알 수 있다.

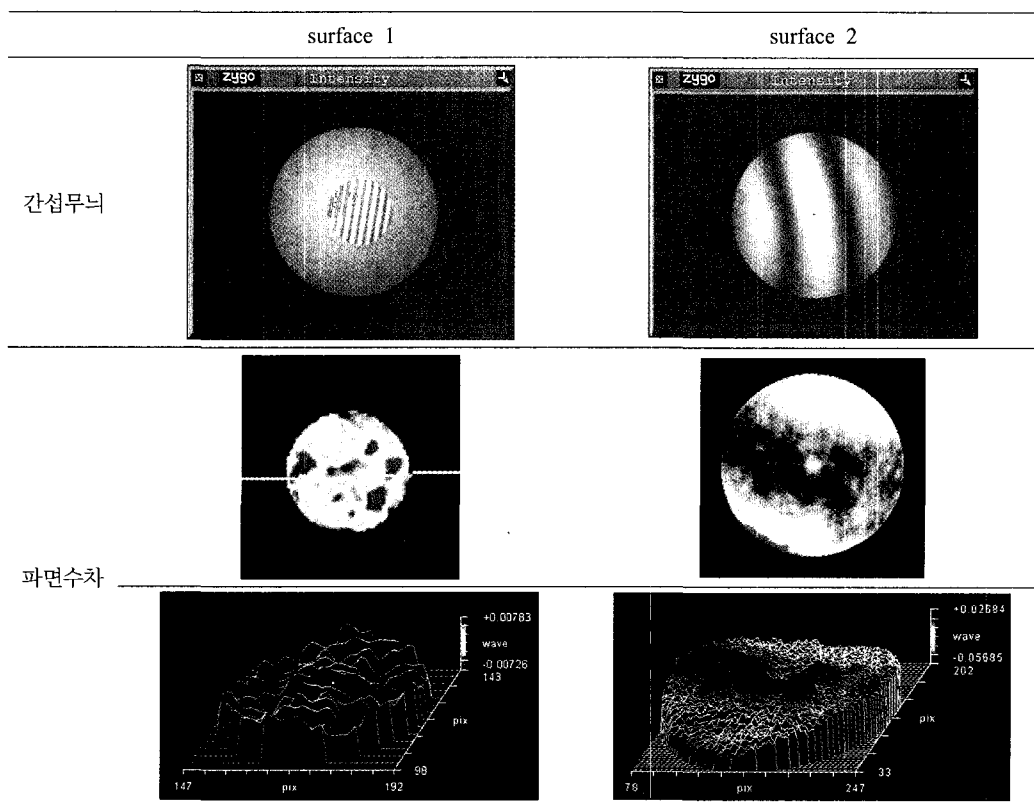


그림 2. 널 렌즈의 형상측정 결과.

표 2. 자동무수차점방식 널 렌즈의 설계 값과 측정값(λ = 632.8 nm).

		곡 른			형상오차	
		설계 값	공 차	측정값	설계값	측정값
널 렌즈1	surface1	평면	±0.1 λ	P-V 0.015 λ RMS 0.003 λ	P-V 0.05 λ	P-V 0.015 λ RMS 0.003 λ
	surface2	-32.957 mm	±0.5 λ	+0.5 λ	P-V 0.1 λ	P-V s 0.084 λ RMS 0.014 λ
두 께		10.0 mm	±0.01 mm	9.988 mm	-	-

여기에서 널 렌즈의 두께에 대한 극미량 변화는 널 광학계의 측정 신뢰도에 미치는 영향이 작기 때문에 널 렌즈 성능에 미치는 영향이 거의 없다<sup>[7]</sup>.

그림 3은 제작된 널 렌즈를 동일한 간섭계로 측정한 결과를 정리한 것이다. 이 그림에서 왼쪽은 1면의 결과이고, 오른쪽은 2면의 결과이다. 그리고 위의 사진들은 간섭무늬의 사진이며, 중간 사진은 파면수차량을 색으로 나타낸 것이고, 맨 아래쪽 그림은 파면수차를 3차원으로 보여주는 그래프이다. 이 결과들을 설계값 및 공차와 더불어 정리한 것이 표 3이다. 즉 표 3은 널 렌즈의 1면과 2면 및 두께에 대한 곡률과 각 면들의 P-V 값과 RMS 값을 보여준다. 결과적으로 제작된 널 렌즈는 면형상(형상비대칭) 그리고 곡률반경이 제작

허용오차를 만족하는 것을 알 수 있다.

그리고 표 2, 3에서 왼쪽 위쪽에 각각 두 렌즈의 형상은 설계 값으로 그린 렌즈들의 모양으로 널 렌즈1이 널 렌즈2보다 더 볼록하다는 것을 알 수 있다. 또한 이렇게 제작한 두 널 렌즈들의 외경은 40 mm이며, 이 외경크기에 대한 제작허용 오차는 -0.01 ~ -0.02 mm로 제작된 외경은 이를 만족한다. 또한 경통에 널 렌즈를 넣을 경우 표 2,3에서 보는 널 렌즈 외경의 약 50% 정도가 유효구경이 된다.

그림 4(a)는 표 2와 표 3의 형상 및 형상오차를 갖는 두 널 렌즈를 조립한 널 렌즈 광학계의 경통 사진이다. 이 경통의 앞뒤와 좌우 수평기울기를 조절하는 조정나사로 이 경통의 기울기를 조정한다. 이 경통의 구조는 그림 4(b)에서 보듯이

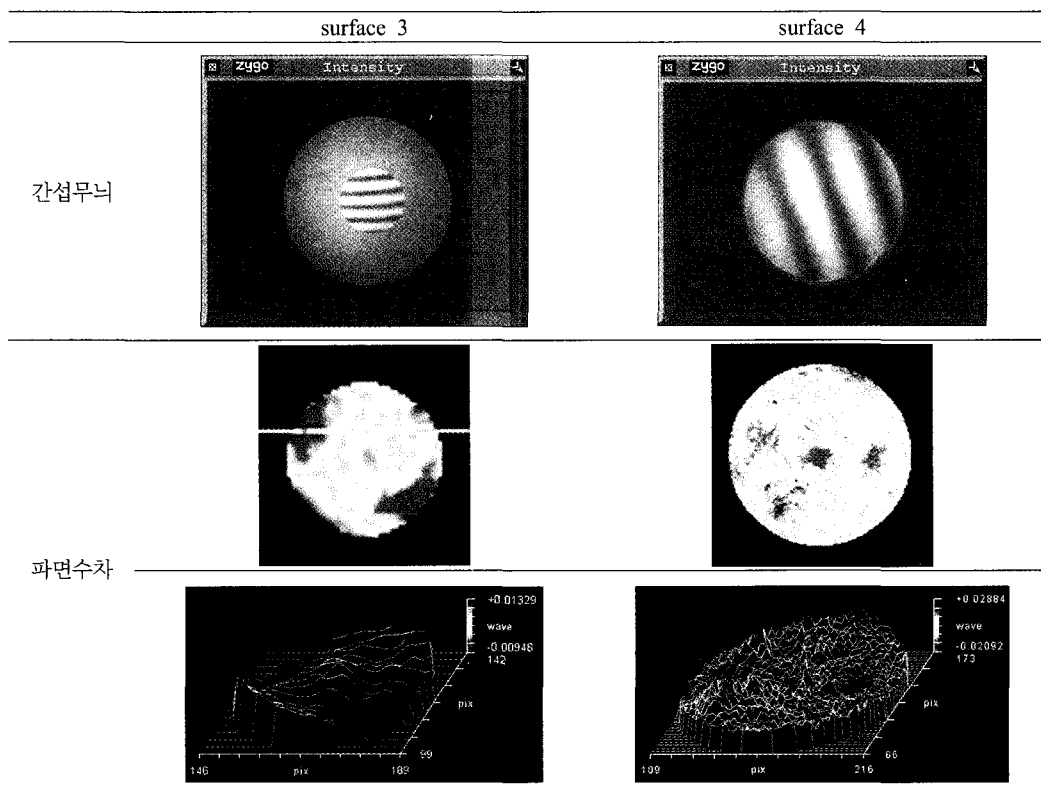


그림 3. 널 렌즈의 형상측정 결과.

표 3. 자동무수차점방식 널 렌즈의 설계 값과 측정값( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ).

		곡률반경			형상오차	
		설계값	공차	측정값	설계값	측정값
널 렌즈2	surface4	평면	$\pm 0.1 \lambda$	P-V $0.023 \lambda$ RMS $0.004 \lambda$	P-V $0.05 \lambda$	P-V $0.023 \lambda$ RMS $0.004 \lambda$
	surface4	-138.307 mm	$\pm 0.5 \lambda$	-0.5 $\lambda$	P-V $0.1 \lambda$	P-V $0.05 \lambda$ RMS $0.007 \lambda$
두께		10.0 mm	$\pm 0.01 \text{ mm}$	9.998 mm		

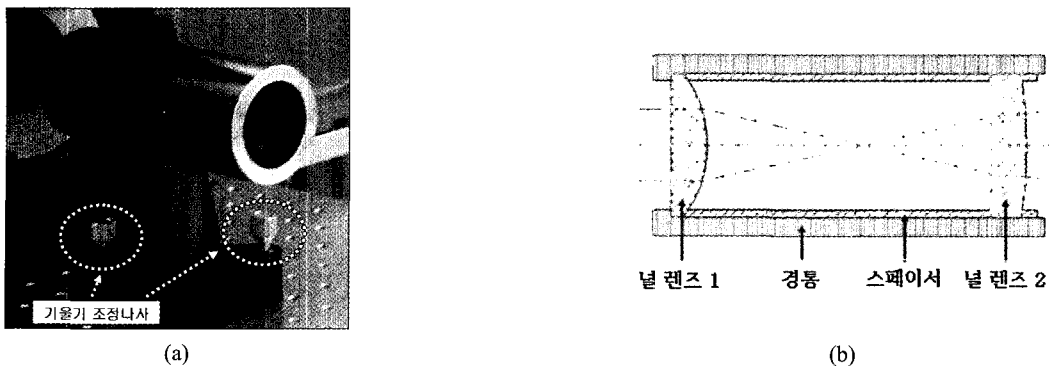


그림 4. 자동무수차점방식 넬 렌즈의 경통.

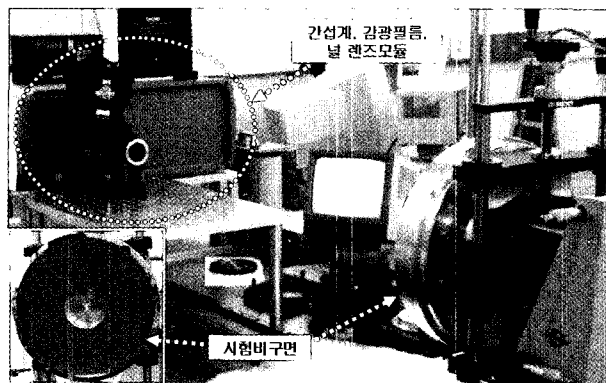


그림 5. DTM으로 제작한 직경 300 mm( $f/1.98$ ) 쌍곡면의 형상 측정을 위한 경통고정식 자동무수차점 방식 넬 렌즈 광학계의 사진.

매우 단순하며, 경통의 재질은 알루미늄이며, 경통 속 넬 렌즈 간 거리는 109.97 mm로 경통과 같은 재질인 알루미늄으로 만든 간격 링(스페이서)을 조정하여 유지한다. 이때 넬 렌즈간의 거리를 제어하는 간격 링의 제작허용오차는  $\pm 0.2$  mm이며, 제작 후 가공오차는  $-0.05$  mm이다.

#### IV. 비구면 측정

비구면은 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  $A, B, C, D, \dots$  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.<sup>[6]</sup>

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

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.<sup>[7]</sup> 그 두 번째가 CNC 머신을 이용하는 방법인데, 자동화기기의 발달과 함께 그 의존도가 점차 높아지고 있는 추세이다.

본 논문에서는 II장과 III장에서 설계하고 제작한 자동무수차점방식 넬 광학계의 성능을 시험하고자 초정밀 비구면 가공기 DTM으로 제작한 직경 300 mm이며  $f$ 수가 1.98인 비구면(쌍곡면) 거울의 형상을 측정하였다. 우선 제작에 사용한 초정밀 비구면 형상 가공기의 비구면 가공성능을 진단하기에 앞서서 직경 6인치의 WYKO 간섭계와  $f$ 수가 1.5인 RTS를 사용하여 구면가공정밀도를 검증하였다. 이 결과, 곡률반경 설계값이  $r = -1191.95$  mm인 직경 300 mm( $f/1.98$ ) 구면을 가공기로 제작한 경우 제작오차가  $\Delta r = \pm 0.5$  mm이라는 것을 알 수 있었다.

그림 5는 DTM으로 제작한 직경 300 mm( $f/1.98$ ) 쌍곡면의 형상 측정을 위한 자동무수차점방식 넬 광학계의 실제 사진이며, 왼쪽에서부터 간섭계, 감광필름, 넬 렌즈 모듈, 시험 비구면 순서로 정렬되어있다. 이때 간섭계에는 RTP(reference testing plate)를 장착하여 사용한다. 여기서 감광필름은 다음과 같은 두 가지 목적으로 사용하였다. 첫째는 시험 비구면

표 4. 널 광학계를 구성하는 요소들의 제작오차( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ).

널 렌즈면		오차	곡률반경	형상	두께
널 렌즈1	surface1	-	-	0.015 $\lambda$	9.988 mm
	surface2	+0.5 $\lambda$	-	0.084 $\lambda$	
널 렌즈2	surface3	-	-	0.023 $\lambda$	9.998 mm
	surface4	-0.5 $\lambda$	-	0.05 $\lambda$	
시험 비구면	surface5	$\pm 0.5 \text{ mm}$	-	-	-
간격 링의 제작오차(길이)			제작오차 -0.05 mm		

에 의해서 재반사되어 돌아오는 광의 세기가 기준평면(RTP)에 의해서 되돌아온 광의 세기에 비해 상대적으로 너무 강해 그 세기를 적감시키기 위함이고, 둘째는 널 렌즈1의 surface1면(평면)과 RTP가 서로 간섭하여 측정결과에 영향을 미치는 것을 방지하기 위해서이다. 이 감광필름은 이러한 목적으로 간섭계와 널 렌즈 모듈 사이에 위치시켰다. 그림 5에서 보면 시험 비구면의 중앙부분에 구멍이 뚫려있는데, 이는 시험 비구면을 Ritchey-Chretien 방식 광학계의 주경부로 활용할 것이기 때문이다.

II장에서 최적설계 후의 자동무수차점방식 널 광학계의 잔류 파면수차는 RMS 0.002  $\lambda$ 이라는 것을 알고 있다. 그리고 실제로 렌즈를 제작하고 경통에 이들을 정렬하는 과정에서 생기는 제작과 정렬오차량은 III장의 표 2, 3과 같다. 이 결과 시험비구면의 제작 정밀도를 배제할 경우, 널 렌즈의 제작 및 정렬오차에 의한 널 광학계의 잔류 파면수차는 RMS 0.0227  $\lambda$ 이다. 여기서 잔류 파면수차는 'Monte-Carlo'방법에 의한 공차분석 결과이다.

표 4는 널 광학계를 구성하는 각 요소들의 제작오차로 표 2와 표 3의 결과를 정리한 것에 각 널 렌즈 및 시험 비구면의 곡률반경 오차 정도를 추가한 표이다. 본 논문에서는 이와 같이 제작오차를 갖는 비구면의 형상을 측정하여 역으로 초정밀 비구면 가공기의 가공 정도를 알 수 있는데, 이때 비구면의 곡률반경과 비구면 형상을 동시에 측정하는 것이 상대적으로 어렵다. 이를 위하여 다음과 같은 방법으로 이를 측정하였다.

간섭계에서는 평면파가 나오는데 측정하고자 하는 면(피검면)이 평면인 경우 간섭계에 RTP를 장착하고 아주 쉽게 평면의 형상을 측정할 수 있으며, 피검면이 구면인 경우에도 간섭계에 구면렌즈 수 매가 하나의 모듈로 구성된 RTS를 장착하여 구면 형상을 측정할 수 있다. 그러나 비구면을 피검면으로 할 경우는 그 방법이 매우 복잡하다.<sup>[7]</sup> 널 렌즈모듈을 통과 후 구면파 또는 평면파는 이상적인 설계 위치에서 설계값을 만족하는 파면을 형성하지만, 그 위치를 벗어날 경우 정도에 따라 설계 값과 매우 다른 결과를 초래할 수 있다. 또한 대구경 비구면의 경우는 구경뿐만 아니고 곡률반경도 매우 길어서 널 렌즈 모듈로부터 시험비구면 간 거리(수천 mm)를 정밀하게 제어하기가 어렵기 때문에 형상측정이 매우 어렵다. 일반적으로 대구경 비구면과 널 렌즈 모듈 간 거

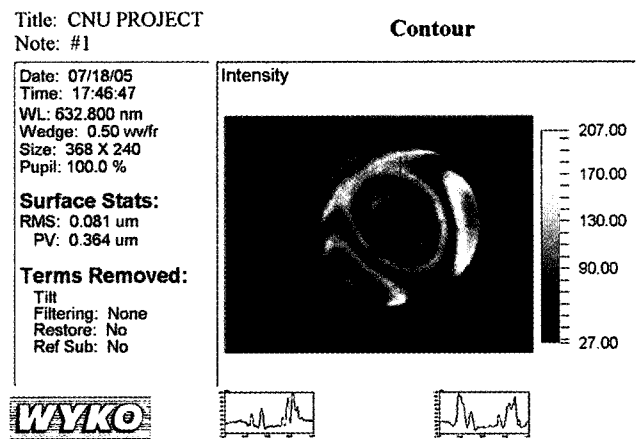


그림 6. 초정밀 비구면 가공기인 DTM으로 제작한 비구면의 형상 측정을 간섭계와 경통고정식 널 렌즈를 사용하여 자동무수차점 방식으로 측정한 결과.

리를 조정인자로 사용하여 얻어진 형상 측정 결과 중, 가장 좋은 값을 실험 결과로 용인하는 방식을 따른다. 그러나 시험비구면이 가공오차를 갖는 경우 널 렌즈모듈로부터 시험 비구면 간 거리는 시험비구면의 가공오차만큼 거리정렬오차를 갖게 된다. 결과적으로 널 광학계의 측정 정밀도는 저하하는데, 그 정도는 시험비구면의 제작 정도에 비례한다는 것이다.

본 논문에서 제작한 널 광학계의 제작·정렬 오차(3.2절)에 의한 잔류파면수차인 RMS 0.0227  $\lambda$ 에 시험비구면의 곡률반경 가공오차( $\Delta r = \pm 0.5 \text{ mm}$ )를 더한 것이 이 널 광학계의 최종 정렬오차이다. 이때의 널 광학계의 잔류파면수차는 RMS 0.0194  $\lambda$ 이고, 시험비구면의 비구면 형상변화량  $\Delta k$ 는 0.00196을 갖는다.

그림 6은 초정밀 비구면 가공기인 DTM으로 제작한 비구면의 형상 측정을 간섭계와 경통고정식 널 렌즈를 사용하여 자동무수차점 방식으로 측정한 결과이다. 그림 6에서 아래 부분의 왼쪽 그래프는 간섭무늬에 나타난 십자선중 수평선의 방향을 따라 분포한 간섭무늬의 복사조도 값이며, 오른쪽 그래프는 십자선의 수직선 방향으로 분포한 간섭무늬의 복사조도 값이다. 그림 6의 왼쪽 표에는 입력값과 최종결과가 나오는데, 결과적으로 제작된 비구면의 형상오차는 RMS로

는 0.081  $\mu\text{m}$ 이고 P-V값으로는 0.364  $\mu\text{m}$ 임을 확인할 수 있었다. 이때 널 테스트 중 시험비구면의 기울기와 편심을 보상자로 사용하기에는 널 렌즈의 편심 기술기와 조립 후 널 렌즈간의 편심과 기울기에 대한 광학계의 민감도는 매우 둔감하므로 형상오차를 유발하는 인자로 고려하지 않았다.<sup>[6]</sup> 이러한 비구면 형상오차는 이 비구면을 가공한 초정밀 비구면 가공기의 최대로 잡을 수 있는 제작한계라고 생각할 수 있다.

## V. 결 론

자동무수차점 방식의 널 렌즈 테스트법은 검사할 광학계의 크기가 커져도 널 렌즈 제작에 사용되는 비용과 시간이 크게 증가하지 않는다는 장점이 있으나 널 렌즈의 제작 및 정렬이 어렵다는 단점이 있다. 특히 자동무수차점 방식의 널 렌즈 테스트법에서 널 렌즈를 경통에 고정하는 경통고정식 방식은 그 조립과정이 매우 어렵지만 기계적으로 환경의 변화에 매우 강한 구조를 갖는 널 렌즈 방식이기 때문에 대구경 비구면의 형상을 측정하는 방법으로는 매우 실전적인 방법이다. 이 때문에 자동무수차점 방식중 경통고정식 널 렌즈 테스트법을 대구경 광학계의 형상측정에 사용하기 위하여 이미 앞서 발표한 참고문헌 [5]에서 이론적으로 설계하고 그 측정정밀도의 한계를 살펴보았던 대구경 비구면의 초정밀 가공을 위한 자동무수차점 방식들 중 정렬과정과 널 렌즈의 고정방법이 어려운 경통고정방식의 널 렌즈를 실제로 제작하여 조립하였다. 이 널 렌즈 및 경통의 제작 허용오차는 요구되는 측정 정밀도를 만족하도록 공차분석기법을 통해 계산하였다. 또한 이 방법을 이용하여 DTM으로 제작한 직경 300 mm의 알루미늄 쌍곡면 비구면 거울( $f/1.98$ )의 형상을 측정하였다.

이 결과 널 광학계의 제작과 정렬오차에 의한 잔류파면수차는 RMS기준으로 0.0227  $\lambda$ 이다. 그리고 측정하고자하는 시험비구면의 곡률반경 제작오차가 최대  $\pm 0.5$  mm이하인 경우, 널 테스트과정에서 이에 대응되는 거리오차(즉, 널 렌즈 모듈로부터 시험비구면까지의 거리오차임)가 발생하게 하는

데 대략 광축방향으로 최대  $\pm 0.5843$  mm의 정렬오차가 발생한다. 그리고 이 정렬오차에 의해 유발된 시험 비구면의 형상오차는 원추곡면계수 값으로 0.00196이었다. 결과적으로 초정밀 DTM으로 제작한 쌍곡면의 가공 정밀도는 P-V 기준으로는 0.364  $\mu\text{m}$ , 즉 632.8 nm 파장에 대해 약  $\lambda/2$ 이고 RMS 기준으로는 약  $\lambda/8$ (정확히는 0.081  $\mu\text{m}$ )임을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] 이종웅, "대구경 비구면 검사를 위한 null 광학계의 설계 및 평가 기술 연구", 한국표준과학연구원 기본연구 보고서, (한국표준과학연구원, 대전, 2002).
- [2] D. Malacara, *Optical Shop Testing*, 2nd Ed., (John Wiley & Sons, New York, 1992) pp. 427-454, pp. 743-762.
- [3] 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.
- [4] 김연수, 김병윤, 이윤우, "쌍곡면 측정 null 렌즈 설계" 한국광학회지, 제 12권 5호, pp. 352-355, 2001.
- [5] 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.
- [6] 이영훈, 임천석 "조정방식과 경통고정방식에 대한 자동무수차점 널 렌즈 광학계의 측정 정밀도 한계 및 신뢰도" 한국광학회지, 제 16권 5호, pp. 440-445, 2005.
- [7] 이영훈, 조재홍, 임천석, 이윤우, 양호순, 이재협, 이인원, "자동무수차점 방식 널 렌즈 광학계를 이용한 직경 450 mm( $f/2.7$ ) 포물면경의 제작 및 측정 평가", 한국광학회지 제 17권 2호, pp.165-174, 2006.

## **Evaluation of a Aluminum Hyperbolic Mirror with the Diameter of 300 mm(f/1.98) by Using the Autostigmatic Null Lens System Assembled in a Fixed Tube Mount**

Young Hun Lee, Jae Heung Jo<sup>†</sup> and Cheon Seog Rim

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

<sup>†</sup>*E-mail: jhjo@hannam.ac.kr*

Yang Sun Choel and Kim Geon Hee

*Ultra Precision Engineering Team, Korea Basic Science Institute, Daejeon, 305-333, Korea*

Won Jong Ho

*Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea*

Youn-Hong Jeong

*Dept. of Visual Optics, Kyungdong University, Gangwon-do, 219-832, Korea*

(Received December 23, 2005, Revised manuscript September 4, 2006)

We design and fabricate an autostigmatic null lens system assembled in a fixed tube mount in order to evaluate the shape of an aluminum hyperbolic mirror with the diameter of 300 mm and the f-number of 1.98, which is fabricated by a high precision aspherical DTM (diamond turning machine). Also, we evaluate the degree of shape of the aspherical mirror by this autostigmatic null lens testing method. The autostigmatic null lens system assembling in a fixed tube mount has several advantages of light weight, good mechanical stability, etc. The permissible fabricating limits of null lenses and a mount are determined by considering various tolerances to assure the measurement reliability.

OCIS code : 080.2740, 080.3620, 220.1250, 220.1920, 220.4840.