

Null CGH를 이용한 포물면경 형상 측정

김태희[†] · 김성하 · 문일권

삼성전자 DM 연구소 디스플레이 그룹
Ⓣ 442-742 수원시 팔달구 매탄3동 416

이윤우

한국표준과학연구원 광기술표준부
Ⓣ 305-600 대전 유성우체국사서함 102호

(2002년 6월 14일 받음, 2002년 11월 13일 수정본 받음)

서로 다른 null optics를 사용하는 null test의 측정결과를 상호 비교함으로써 null CGH test의 신뢰성을 알아보았다. 회전대칭 포물면경(90 mm, F/0.76) 형상측정 및 측정장치 정렬용 null CGH를 설계, encoding, 제작 후 null CGH test를 실시하였다. 결과를 평면경을 null optics로 사용하는 autocollimation test 측정치와 비교하여 null CGH test의 정확성을 평가하였다.

주제어 : null test, parabolic mirror, CGH.

I. 서 론

비구면 광학소자는 구면으로는 해결하기 어려운 수차를 제거할 수 있으며 광학기기를 소형화 및 경량화 시킬 수 있다. 최근 디스플레이 시스템이 대화면, 소형·경량화, 고화질화 됨에 따라 여기에 사용되는 비구면은 대구경, 고비구면화와 더불어 보다 높은 제작 정확도가 요구되고 있는 추세이다.

비구면 형상은 측침을 이용하는 직접형상 측정이나 간섭계를 이용한 측정에 의해 시험될 수 있다. 직접형상측정은 사용이 편리하지만 측정시간이 많이 걸리고 정확도가 간섭계를 이용한 측정보다 떨어진다. 간섭계를 이용한 측정에서는 null-optics를 사용하는 null test를 주로 사용한다. Null test란 null-optics를 통과한 광파면이 이상적인 시험 비구면 형상이 되도록 하여 시험 비구면과 간섭적으로 비교하는 방법이다.^[1]

비구면 파면을 만드는 null optics는 2장 이상의 굴절형 혹은 반사형 구면소자로 구성된다. 그런데 null optics를 구성하는 소자의 곡률반경, 두께, 면형상, 소자간 위치 등에서 발생하는 오차는 null test 측정오차에 민감하게 영향을 미치므로, null optics용 소자의 매수는 가능한 최소로 유지되어야 하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 여러 개의 구면소자를 대체할 수 있는 CGH가 1971년 Wyant 등에 의해 사용된 이래 지금까지 20년 동안 비구면 test에 사용되고 있다.^[2-4]

비구면 null test 과정에서 오차가 발생하면 이것이 형상오차로 잘못 해석되어 이를 이용하여 제작된 비구면도 오차를 가지므로, null test의 신뢰성 입증에 필요하다. 만약 2개 이상의 독립적인 null optics를 사용한 null test 결과가 허용하는 오차범위 내에서 일치하면 양 null test 모두 정확성이 우수하다

고 할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 서로 다른 null optics를 사용하는 null test의 측정결과를 상호 비교함으로써 null CGH test의 정확성 알아보고자 하였다. 회전대칭 포물면경(90 mm, F/0.76)의 형상측정 및 측정장치 정렬용으로 circular patterns의 null CGH를 설계, encoding, 제작 후 null CGH test를 실시하였다. 결과를 평면경을 null optics로 사용하는 autocollimation test 측정치와 비교하여 null CGH test의 정확성을 평가하였다.

II. Null CGH

본 절에서는 비구면 측정용 null CGH와 정렬용 null CGH를 설계하였다. Null CGH를 설계한다는 것은 시험되는 비구면과 동일한 이상적인 비구면파와 이 비구면파를 얻기 위하여 사용되는 파가 정의될 때 이 두파면의 CGH 면에서의 위상차이인 CGH 함수를 구하는 것을 의미한다. CGH 함수는 시험 비구면과 간섭계의 구성을 결정한 후 상용 광학설계 소프트웨어나 해석적 모델을 사용하여 구할 수 있다.

비구면 측정용 CGH 함수는 중심영역에서 급격하게 변하는 복잡한 형상을 가지고 있어 상용 소프트웨어의 최적화에 의해서는 잘 설계되지 않으므로, 해석적 모델을 사용하였다. 반면 정렬용 CGH 함수는 간단한 구면 형상을 가지고 있어 상용 렌즈설계 소프트웨어의 최적화를 사용하였다. 이들은 편리성을 위해 single pass mode에서 설계되었다.

2.1. 비구면용 CGH 설계

곡률반경 120 mm, 원추계수 -1.0, 유효구경 90 mm, F# 0.76, vertex plane로부터 최대 sag 8.4 mm, best-fit radius로부터 최대 sag 0.073 m의 설계 특성을 가지는 회전대칭 시험 포물면경의 null CGH test 장치를 그림 1과 같이 구성하였다.

[†]E-mail: thkim3@samsung.co.kr

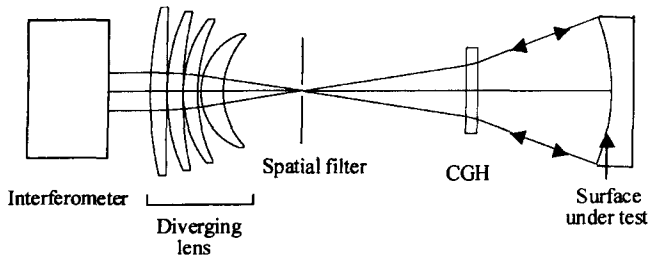


그림 1. Null CGH test 를 이용한 포물면경 형상 측정장치 구성도.

Fizeau 간섭계를 사용하였으며, CGH를 시험 포물면경과 같은 쪽에 위치시켜 시험광선만이 CGH를 지나가도록 하였다.

CGH 함수식을 유도하기 위하여 그림 2와 같이 시험 포물면경을 물체면, spatial filter 면을 상면으로 두었다. CGH 설계오차가 형상오차로 잘못 해석되는 경우를 방지하기 위하여 비구면에서 수직하게 출사한 광선들은 null CGH를 통과 후 상면에 완전하게 초점을 맺는다고 가정하였다.

포물면경의 임의의 위치 O 에서 출사하여 CGH의 $H'(r)$ 를 통과 후 상점 I 에 수렴하는 비축광선의 광경로를 OPL' , 포물면경의 중심 O 에서 출사하여 CGH의 중심 $H(r_0)$ 를 통과 후 상점 I 에 수렴하는 축광선의 광경로 OPL_0 라고 하면, OPL' 와 OPL_0 는 각각

$$OPL'(r) = O'H' + H'I \tag{1}$$

$$O'H' = \sqrt{(H'_x - O'_x)^2 + (H'_y - O'_y)^2 + (H'_z - O'_z)^2} \tag{2}$$

$$H'I = \sqrt{(I_x - H'_x)^2 + (I_y - H'_y)^2 + (I_z - H'_z)^2} \tag{3}$$

$$OPL_0(r_0) = OH + HI \tag{4}$$

$$OH = |H_z - O_z| \tag{5}$$

$$HI = |I_z - H_z| \tag{6}$$

이다.

기준점을 CGH의 중심으로 두고 포물면경에서 출사한 광선들은 상면에서 완전하게 수렴한다는 가정을 적용시키면, CGH 함수식은

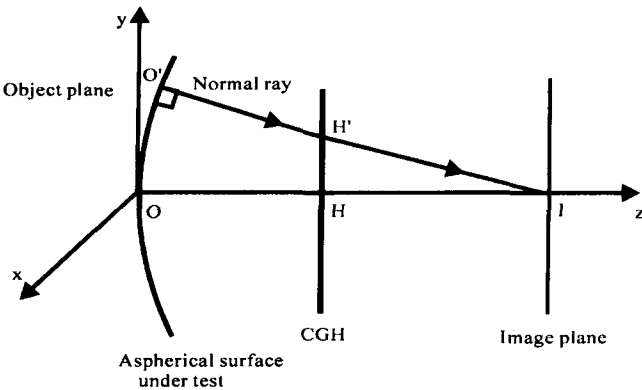


그림 2. CGH 함수식 유도를 위한 기하학적 개략도.

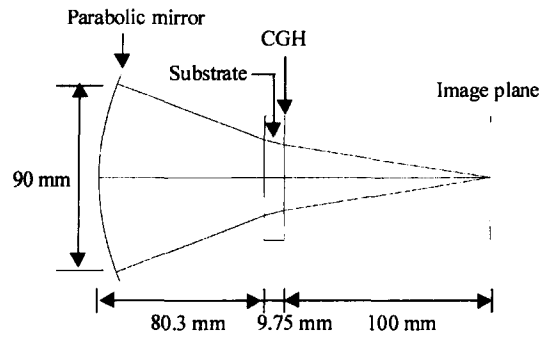


그림 3. 시험 포물면경의 null CGH를 설계하기 위해 설정한 광학계 설계 변수.

$$\phi(r) = OPL'(r) - OPL_0(r_0) \tag{7}$$

로 주어진다.^[2]

그림 3은 null CGH 설계를 위해 설정한 포물면경 측정용 광학계의 설계자료이다. CGH substrate의 재질은 열에 대하여 안정성이 우수한 fused silica를 사용하였다. 이들 설계자료를 사용하여 CGH 함수식 (7)로부터 계산한 CGH 함수를 그림 4에

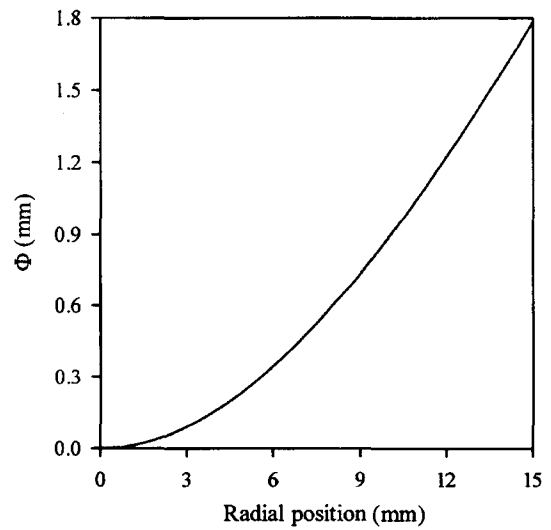


그림 4. CGH 함수. 수직 축은 CGH 함수, 수평 축은 CGH 면에서의 radial position 을 나타낸다.

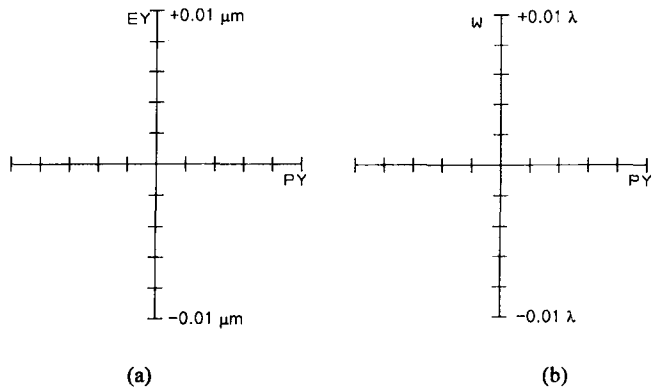


그림 5. 상면에서의 (a) 광선수차와 (b) 파면수차.

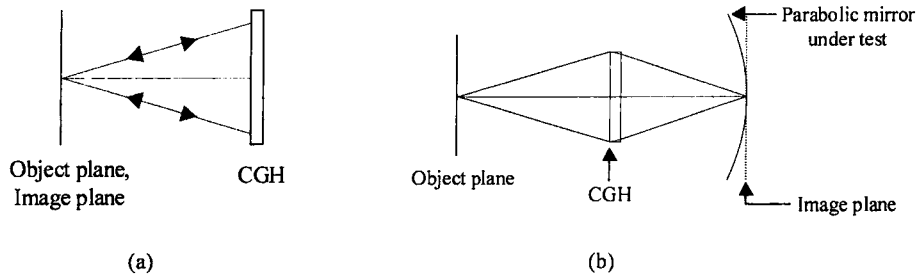


그림 6. (a) CGH의 tip/tilt와 defocus (b) 시험 포물면경의 defocus 오차 점검용 alignment CGH 설계를 위한 광학적 개략도.

나타내었다. 그림 5(a)와 (b)는 상면에서의 광선수차와 파면수차이다. 633 nm 파장의 +1차 회절빔에 대해 P-V(peak-to-valley) 광선수차와 파면수차는 0.01 μm와 0.01 wave 보다 작아서 전체적으로 만족스러운 성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

2.2. 정렬용 CGH 설계

Null CGH를 사용하여 비구면을 평가하면 정렬과정에서 많은 자유도가 존재한다. 이로 인한 정렬 오차를 줄이기 위해 본 절에서는 CGH와 시험 포물면경 각각의 정렬을 위한 Null CGH를^[5] 설계하였다.

먼저 그림 3의 광학계를 거꾸로 구성하여 상점을 물체점으로 두었다. 다음으로 CGH 자체의 tip/tilt와 defocus점검을 위한 경우 물체점과 상점을 동일한 위치에 두어 물체점에서 출사한 빔은 그림 6(a)와 같이 CGH면에서 회절하여 반사된 후 동일한 광경로를 따라서 상점으로 수렴시켰다. 시험 비구면의 defocus 점검을 위한 경우는 비구면의 정점과 광축이 만나는 지점을 상점으로 두어 그림 6(b)와 같이 물체점에서 출사한 빔은 CGH 면에서 회절 투과된 후 상점에 수렴하도록 하였다.

상용 렌즈설계 소프트웨어에서 광축에 대해 회전대칭성을 가지는 CGH 함수는

$$\phi(r) = \frac{1}{m}(C_1r^2 + C_2r^4 + C_3r^6 + \dots)$$

로 주어진다. 여기서 r은 광축으로부터의 거리이고 m은 사용하고자하는 회절빔의 차수이다. C₁, C₂, ...는 각 항의 위상계수로써 최적화를 통해 이들 계수를 적절히 조절하여 최적 설계된 CGH 함수를 얻을 수 있다.

표 1은 최적화를 통해 얻은 CGH의 위상계수이다. 최적 설

표 1. 최적화를 통해 설계된 정렬용 null CGH의 위상계수.

위상계수	CGH 정렬용	시험 포물면경 정렬용
C ₁	-0.003582557452	-3.333333 e-3
C ₂	0.1023842252 e-6	8.333333254 e-8
C ₃	-0.58487212 e-11	-0.41667488 e-11
C ₄	0.420196916 e-15	0.261028598 e-15
C ₅	-0.3408795 e-19	-0.2077156 e-19
C ₆	0.297683539 e-23	0.769386165 e-23
C ₇	-0.26261844 e-27	-0.97568134 e-26
C ₈	0.178569714 e-31	0.884782617 e-29
C ₉	-	-0.44655134 e-32
C ₁₀	-	0.955991197 e-36

계된 CGH 정렬용과 시험 포물경 정렬용 모두 633 nm 파장의 +3차 회절빔에 대해 상면에서 0.01 μm와 0.01 wave 이하의 P-V광선수차와 파면수차를 나타내었다.

광학계 설계자료는 그림 3과 동일하며, NA=0.3048에서 3차 회절빔에 대해 최적 설계되었다.

2.3. CGH encoding

Circular pattern으로 설계된 CGH를 binary 형태로 제작하기 위하여 CGH함수를 encoding 하였다. 회절효율과 CGH 제작장비의 제작한계를 고려하여 회절차수, duty cycle, groove depth를 최적으로 선택한 후, CGH 함수에서 각 circular pattern의 inside ring과 outside ring 위치를 구하였다.

본 논문에서는 CGH 제작의 편리성을 위해 duty cycle을 0.5로 선택하였으며 이를 사용하여 참고문헌^[2]의 회절 효율 식으로부터 최대의 회절효율을 위한 groove depth 1λ를 얻었다. Duty cycle 이 0.5, groove depth가 1λ인 경우, CGH circular pattern의 inside ring과 outside ring의 위치는 식 (9)와 (10)으로 주어지며

At i-th inside ring

$$\phi(r_{i1}) = \left(i \cdot 2\pi - \frac{\pi}{2}\right) \cdot m, \quad (i = 1, 2, \dots) \tag{9}$$

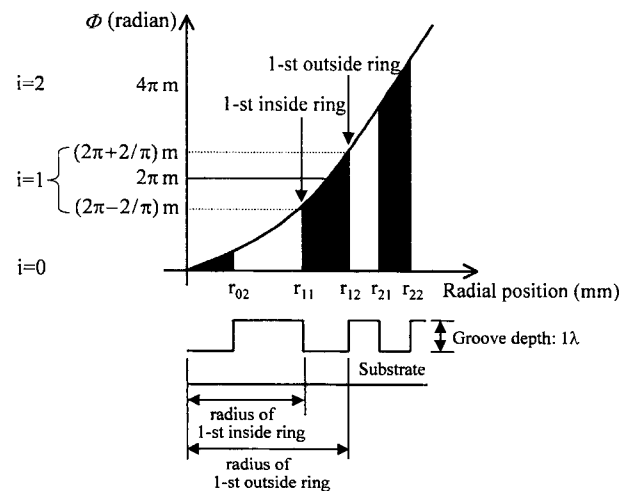


그림 7. Binary형 CGH 제작을 위한 CGH 함수의 encoding. (Ring number=i, 회절차수=m, Duty cycle=0.5, Groove depth=1λ).

표 2. CGH 특성

Parameter	Value		
	Main CGH	Alignment CGH	
		For CGH (A1)	For tested lens(A2)
Grating type	Binary phase grating	Binary amplitude grating	Binary phase grating
Material (chrome)		$n_{\text{chrome}} = 3.6 - i4.4$	
Material (glass)		Fused silica ($n_{\text{glass}} = 1.46$)	
Operating mode	Transmission	Reflection	Transmission
Diffraction order	1 st order	3 rd order	3 rd order
Smallest grating spacing	3.2 μm	3.3 μm	3.09 μm
Grating groove depth	1λ (2 π radian)	Chrome thickness: 100 nm	1λ (2 π radian)
Grating duty-cycle		50%	

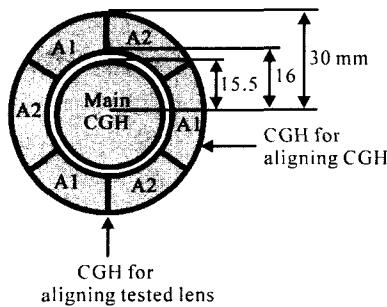


그림 8. 유리 기판 위에 기록되는 CGH 형상.

At i -th outside ring

$$\phi(r_{i2}) = \left(i \cdot 2\pi + \frac{\pi}{2} \right) \cdot m, \quad (i = 0, 1, \dots) \quad (10)$$

이러한 CGH encoding의 예를 그림 8에 설명하였다. 여기서 i 는 ring number, m 은 회절차수를 나타낸다.

설계된 CGH 함수의 encoding 결과를 표 2에 나타내었다. 비구면 test용 위상형 CGH는 투과 모드로 +1차 회절빔에서 동작하도록 설계되었다. D 는 0.5이며, 반경 15.5 mm 내에 총 2971개의 ring을 가진다. groove-to-groove spacing은 hologram의 직경이 증가함에 따라 감소하여, 최소 groove-to-groove spacing은 반경 15.5 mm 지점에서 3 μm 이다. Groove depth는 1λ ($\lambda=632.8$ nm)이다.

CGH 정렬용 진폭형 CGH는 반사 모드로 +3차 회절빔에서 동작한다. D 는 0.5, 반경 16-30 mm 내에 총 3315개의 ring을 가지며, 최소 groove-to-groove spacing은 반경 30 mm에서 3 μm 이다. Chrome의 두께는 100 nm이다. 포물경 정렬용 위상형 CGH는 투과 모드에서 +3차 회절빔으로 동작한다. 반경 16-30 mm 내에 총 3549개의 ring을 가지며, 반경 30 mm에서 3 μm 의 최소 groove-to-groove spacing을 가진다. Groove depth는 1λ ($\lambda=632.8$ nm)이다.

이상의 설계와 encoding을 거친 CGH가 유리기판에 기록되는 영역을 그림 8에 나타내었다. CGH는 러시아 IAE (Institute of automation and electrometry)에서 laser writing machine으로 chrome-on-glass에 등배율로 CGH 패턴을 그려서 진폭형 CGH로, 이것을 다시 etching 하여 위상형 CGH로 제작되었다.

III. 실험 및 결과

시험 포물면경은 열적 안정성이 우수한 fused silica 를 사용하여 한국표준과학연구소에서 제작하였다

3.1. null CGH test

포물면경 형상 측정을 위한 null CGH test 장치를 그림 1과 같이 구성하였다. CGH에서 발생되는 원하지 않는 차수의 회절빔들을 제거하기 위하여 diverging lens의 초점면에 spatial filter를 두었다. CGH와 시험 포물면경은 x, y, z 및 tip/tilt를 조절할 수 있는 마운트에 장착되었다.

측정 과정 동안 발생한 random error를 제거하기 위해 동일한 위치에서 포물면경을 4번 측정하여 phase map을 평균하였다. Wavefront tilt와 power를 제거하여 정렬에 기인한 오차를 제거 후 low pass filtering을 실시하여 high frequency noise error를 제거하였다. 최종적으로 얻어진 phase map을 그림 9에 나타내었다. 그림 9로부터 시험 포물면경은 P-V 0.36 λ , rms 0.05 λ 의 형상오차를 가짐을 알 수 있다.

그림 9의 phase map에서 y 축 방향을 따라 존재하는 비점수차를 관찰할 수 있다. 비점수차의 발생 원인을 알아보기 위하여 CGH와 시험 포물면경을 독립적으로 회전시키면서 test 를 수행하였다. CGH를 120° 씩 회전시키면서 측정한 phase map을 그림 10에 나타내었다. CGH의 회전에 불구하고 phase map의 비점수차축은 일정하게 고정되어 있다. 그러므로 phase map의 비점수차는 CGH에 무관한 것임을 알 수 있다. 시험 포물면경을 120° 씩 회전시키면서 측정한 phase map을 그림 11에 나타내었다. 비점수차 축은 시험 포물면경의 회전 방향과 무관하게 임의로 회전함을 알 수 있다. 이로부터 phase map의 비점수차는 시험 포물면경의 형상오차와는 무관하며, 측정 과정에서 발생한 임의의 오차에 기인한 것으로 판단된다.

3.2. Autocollimation test

그림 12는 광축에 평행하게 들어온 광선을 정확하게 초점에 모으는 포물면경의 성질을 이용하는 autocollimation test 실험 장치도이다.

Diverging 렌즈의 초점과 포물면경의 초점을 일치시키고 중앙에 부채꼴 형태로 구멍이 뚫려진 기준 평면경을 초점면에

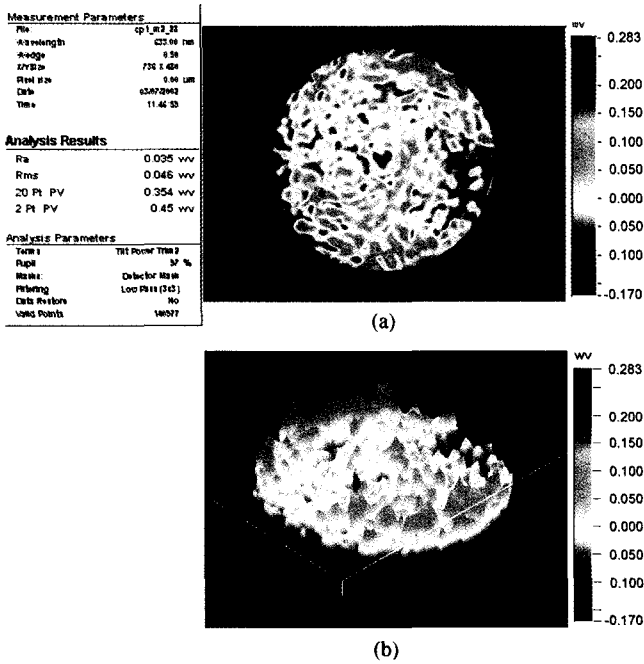


그림 9. 측정된 (a) 2차원, (b) 3차원 Phase map

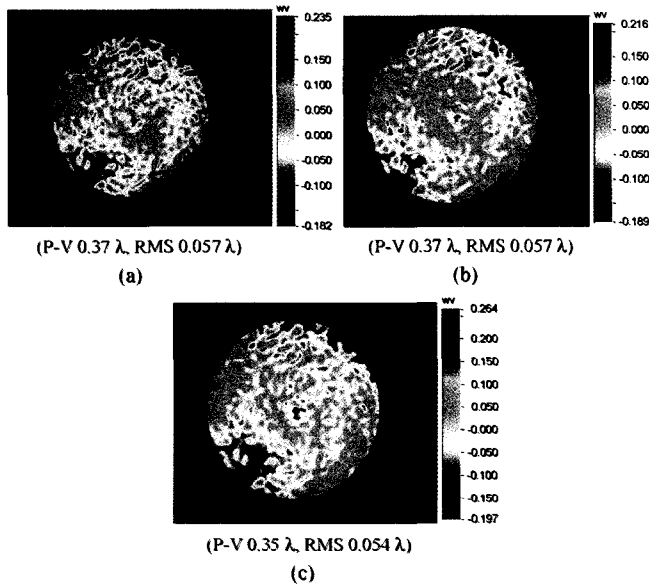


그림 10. CGH의 회전에 따라 측정된 phase map. 회전각도 (a) 0°, (b) 120°, (c) 240°.

위치시킨다. Diverging 렌즈에서 출사하여 포물면경에서 반사된 평행광은 기준 평면경에서 재반사된 후 동일한 광경로를 따라 간섭계로 되돌아 간다. 기준 평면경과 시험 포물면경은 각각 x, y, z 및 tip/tilt 가 조정이 가능한 마운트에 장착되었다.

측정과정 동안 발생한 오차를 제거하기 위하여 3.1절과 동일한 과정을 수행한 후 최종적으로 얻어진 포물면경의 wavefront phase map을 그림 13에 나타내었다. 기준 평면경의 형상오차는 P-V 0.1λ, RMS 0.02λ 이하이며 기준 평면경의 형상오차가 autocollimation test에서 얻어진 phase map

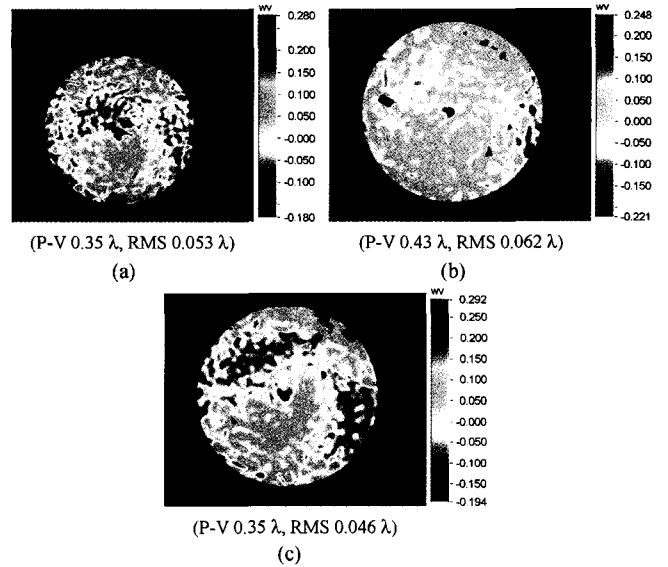


그림 11. 시험 포물면경의 회전에 따라 측정된 phase map. 회전각도 (a) 0°, (b) 120°, (c) 240°. Phase map의 검은 점은 포물면경에 부착한 기준 mark 에 의한 것임.

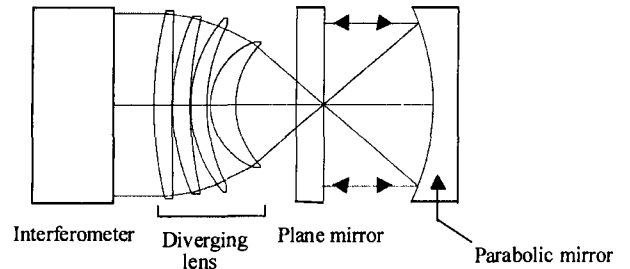


그림 12. Autocollimation test를 이용한 포물면경 측정장치.

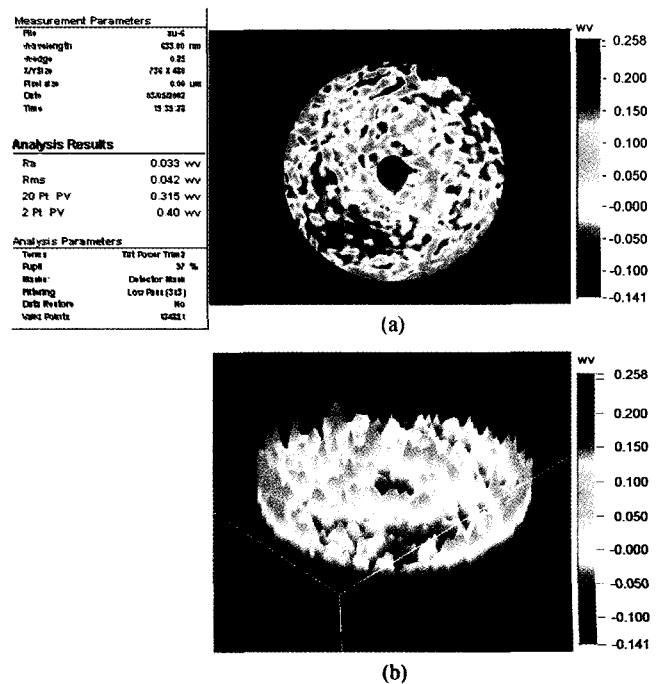


그림 13. 측정된 (a) 2차원Phase map, (b) 3차원 phase map.

표 3. 측정된 시험 포물면경의 형상 오차.

	Null CGH test	Autocollimation test	Reference data
P-V wavefront error	0.36 λ	0.31 λ	0.31 λ
RMS wavefront error	0.05 λ	0.04 λ	0.04 λ

에 미치는 영향은 포물면경 보다 0.5배 작으므로, 기준 평면경의 형상오차를 무시하였다. 그림 13으로부터 시험 포물면경은 P-V 0.31 λ , RMS 0.04 λ 의 형상오차를 가짐을 알 수 있다.

표 3은 null CGH test와 autocollimation test에 의해 측정된 시험 포물면경의 형상 오차값을 정리한 것이다. Reference data는 한국 표준연구소에서 본 논문에서 사용된 것과 동일한 기준 평면경을 사용하여 autocollimation test 한 결과이다. 이들 값을 상호 비교하여 null CGH test의 정확도를 평가한 결과, 포물면경 형상오차 측정값은 P-V 0.05 λ , RMS 0.01 λ 이내에서 reference data 및 autocollimation test 결과와 일치함을 알 수 있었다.

IV. 결 론

복잡한 null optics 없이 비구면 특성을 이용하여 간편하게 null test를 수행할 수 있는 회전대칭 포물면경을 시험 비구면으로 두어 null CGH test를 이용한 비구면 형상 측정의 정확도를 알아보았다.

피조형 간섭계를 사용하여 시험 빔만이 포물면경을 조사하도록 측정장치를 구성한 후 CGH를 설계하여 null CGH test를 실시하였다. 또한 평행하게 입사한 빔은 포물면경에서 반사 후 초점에 완전하게 수렴한다는 aplanatic 특성을 이용하여 기준 평면경에 의한 null test를 실시하였다. 그리고 동일한 기준 평면경을 사용하여 한국 표준연구소에서 시험 포물면경 형

상을 측정한 후 이를 reference data로 사용하였다.

포물면경 형상오차는 null CGH test를 사용한 경우 P-V 0.36 λ 와 RMS 0.05 λ 로 측정되었으며, autocollimation test를 사용한 경우 reference data와 동일한 P-V 0.31 λ 와 RMS 0.04 λ 로 측정되었다. 이들 값을 상호 비교하여 null CGH test의 정확도를 평가한 결과, 포물면경 형상오차 측정값은 P-V 0.05 λ , RMS 0.01 λ 이내에서 reference data 및 autocollimation test 값과 일치함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 이윤우, "고해상도 위성카메라 평가기술," 측정표준, vol. 22, pp. 29-42, 1999.
- [2] J. H. Burge, "Advanced techniques for measuring primary mirrors for astronomical telescopes," Ph.D. dissertation, Optical Sciences Center, University of Arizona, 1993.
- [3] Y.-C. Chang, "Diffraction wavefront analysis of computer-generated holograms," Ph.D. dissertation, Optical Sciences Center, University of Arizona, 1993.
- [4] J. H. Burge, "Measurement of large convex asphere," *Proc. SPIE*, 2871, pp. 362-372, 1997.
- [5] A. G. Poleschchuk, E. G. Churin, V. P. Korolkov, and J.-M. Asfour, "Hybrid refractive-diffractive null corrector for high accuracy figure metrology of deep aspherical surfaces," *Proc. DOMO-2000*, 2000.

Null computer generated hologram test for measurement of parabolic mirror

Taehee Kim[†], Sungha Kim and Il-kwon Moon

Digital Media R&D Center, SAMSUNG Electronics Co., Ltd., Kyungki-do 442-742, KOREA

[†]E-mail: thkim3@samsung.co.kr

Yunwoo Lee

Division of optical metrology, Korea Research Institute of Standards and Science,
Daejeon 305-600, KOREA

(Received June 14, 2002; Revised manuscript received November 13, 2002)

Null tests using two different kinds of null corrector have been discussed. A parabolic mirror was used as a surface under test. After designing, encoding, and fabricating the CGH (computer generated hologram), the null CGH test was performed. An autocollimation test was also performed using a flat mirror. The reliability of the null CGH test has been discussed by comparing the results obtained by both null tests.

Classification codes : OE.050, LO.060.