

대형 비구면의 초정밀 가공을 위한 자동무수차점 방식의 널 렌즈 설계 및 측정 정밀도의 한계에 관한 연구

김길선[†] · 임천석

한남대학교 자연과학부 광·전자물리학 전공
⑨ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

(2004년 6월 7일 받음, 2004년 10월 13일 수정본 받음)

대형 비구면의 축성을 위하여 자동무수차점 방식의 2매 구성 널 렌즈를 설계하였고, 제작과 정렬 오차에 따른 측정 정밀도의 한계를 이론적으로 분석해 보았다. 측정 정밀도의 한계를 결정짓는 주요한 공차 요소는 널 렌즈면의 불규칙도(irregularity)임을 확인하였으며, 불규칙도의 가공 정도에 따라 $5\lambda/100 \sim 4\lambda/1000$ 정도까지의 신뢰할 수 있는 측정 정밀도가 한정되어졌다. 이로써 실제의 정렬 오차 및 널 렌즈 제작오차까지 고려하여 신뢰할 수 있는 정밀도 한계를 제시할 수 있었다.

주제어 : autostigmatic, null lens, tolerance analysis, large aspherical mirror.

I. 서 론

초정밀 가공기술의 발달로 결상광학분야에 일대 혁신이 일어났는데, 종래 구면만으로는 한계에 부딪혔던 결상의 고성능화 및 경박 단소화의 새로운 해결책으로써 초정밀 비구면이 등장하였다. 이로써, 일반 카메라의 성능과 크기를 획기적으로 줄일 수 있었으며, 더 나아가 반도체 노광장비용 대형 반사경에도 사용할 수 있게 되었다. 이외에도 국내외에서 최근 많이 각광받고 있는 지구관측 또는 군사용 위성 등의 우주환경용 초정밀 대형 비구면에도 사용되어지고 있다.

대형 비구면 반사경의 다양한 활용 및 응용은 향후 국책과 제로써도 중요한 근간기술이 될 것임은 자명하며, 이에 부응하여 대형 비구면 반사경을 제작할 수 있는 초정밀 기술뿐만 아니라 이를 제대로 측정·평가할 수 있는 기술을 개발하는 것은 무엇보다도 중요하다고 생각된다.

본 논문에서는 대형 비구면을 측정·평가할 수 있는 방법으로써, 접촉식 측정에 비해 측정 정밀도 및 신뢰도가 높은 광학식 측정법인 널 렌즈(null lens, 시험 비구면의 제작 오차가 없다면 접광원을 접광원으로 결상시키는 렌즈) 측정법^[1-3]을 연구하였다. 한편, 널 렌즈 측정법은 크게 2가지로 나누어지는데, 자동무수차점(autostigmatic) 방식과 자동시준(autocollimation) 방식^[3-6]으로써 서로 장단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 자동 시준 방식에 비해 측정 감도는 떨어지지만^[2,6], 측정 비구면보다 큰 대형 평면 반사면을 필요로 하지 않는 자동무수차점 방식에 관해 설계 및 공차분석을 진행하였다. 이에 대해서는 국내외 여러 연구들이 보고 된 바 있으나, 본 연구는 기존의 연구들과는 달리 널 렌즈의 설계에

만 그치지 않고, 실제의 측정 환경 및 널 렌즈 제작오차까지 고려하여 측정 할 수 있는 정밀도 한계를 이론적으로 분석해 보았다는 것이 가장 큰 특징이다.

II. 공차항목 및 관련 이론의 해설

렌즈의 성능은 통상 렌즈(광 부품)의 제작공차, 렌즈를 고정하는 기구물공차, 조립 시 발생하는 정렬공차, 환경변화(온도, 습도, 압력 등)에 의한 요인으로 인해 당초 설계 성능보다 저하되는 것이 일반적이다. 경우에 따라서는 렌즈의 제작 공차를 단품공차라고 하고, 기구물공차와 조립공차를 뮤어 취부공차라고 부르기도 한다. 널 렌즈 측정은 온도와 습도가 상온으로 일정하게 유지되는 광학 실험실에서 진행되므로 본 논문에서는 환경공차를 제외하고 단품과 취부공차만 고려한다.

단품공차는 렌즈면의 곡률공차, 비구면 계수, 불규칙도(irregularity), 표면조도(roughness), S & D(Scratch & Dig), 두께, 굴절률 및 v값(분산의 역수), 렌즈면의 편심(x, y, z) 및 기울기(α, β, γ)로 분류할 수 있고, 취부공차는 정렬에 관계되는 공차이므로 편심 및 기울기로 분류할 수 있다.

(1) 곡률공차

곡률공차는 뉴턴 링과 다음 식 (1)로 주어지는 관계가 있다.

$$\Delta R = \left(\frac{2R}{D} \right)^2 \lambda N \quad (1)$$

여기서, ΔR 은 곡률공차, D 는 렌즈의 직경, λ 는 측정파장, N 은 뉴턴 링의 개수이다.

(2) 비구면 계수

렌즈 면이 비구면인 경우(통상 광축에 대해 회전대칭형 비

[†]E-mail: roadsunny@empal.com

구면을 많이 사용, 식 (2)^[7] 참조), 형상오차는 비구면 계수 값의 공차량으로 정의되는데, 비구면 계수의 공차량(원주곡면 계수인 Δk 와 $\Delta A, \Delta B, \Delta C, \Delta D, \dots$)에 의해 면의 정점에 대한 sag량의 변화 Δz 를 계산하여 마이크로미터 단위로 표현하거나, Δz 를 $\lambda/2$ 로 나누어 측정 파장에 대한 간섭무늬의 개수로 표현하기도 한다.

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

여기서, $s^2 = x^2 + y^2$ 이다.

(3) 불규칙도(irregularity)

렌즈 면이 광축에 대하여 회전 대칭 형상을 가지는 면일지라도, 제작 과정에서는 필연적으로 비대칭적인 형상오차를 수반하게 되는데, 이를 불규칙도라 하고, 통상 두 수직한 방향간의 간섭무늬 개수의 차이로 정의된다.

(4) 표면조도(roughness)

표면조도는 표면 거칠기라고 부르기도 하는데, 통상 nm 또는 Å 정도의 크기를 갖는다.

(5) S & D(scratch & dig)

면의 절은 scratch 와 dig(S & D)로써 규정할 수 있는데, 규격은 80~50, 60~40과 같이 주어지곤 한다. 예를 들어, S & D가 80~50이면 80/1000 mm~50/100 mm를 의미하고, 이는 스크래치의 폭이 80 μm 이고, 파인 홈의 직경이 0.5 mm 이하라는 것이다.

(6) 두께

두께는 렌즈의 두께 편차에 대한 공차를 의미한다.

(7) 굴절률 및 v값(분산의 역수)

굴절률과 v값(Abbe v number = $(n_d - 1)/(n_F - n_C)$)은 광학유리의 대표적인 광학 특성으로 같은 모델의 광학 유리라 할지라도 만드는 과정에서의 약간의 차이(외부환경 및 열처리 과정 등의 차이)로 인해 제품별로 굴절률 및 v값의 미소한 편차가 발생하게 된다. 굴절률에 있어서 크라운 유리의 공차는 ± 0.001 정도이고, 플린트 유리의 공차는 ± 0.0015 정도이다. 그

리고 v값의 공차는 46 아래에서는 ± 0.3 정도, 46~58에서는 ± 0.4 정도, 58 이상에서는 ± 0.5 정도로 주어진다^[8]. 여기서 제시한 공차는 절대적인 것이 아니고 통상의 값들을 제시하였고, 공차의 허용 범위가 좁아지면 좁아질수록 가격은 올라간다.

(8) 편심 및 기울기

편심은 x, y, z축 방향으로 광학 면 또는 렌즈(그룹)가 기준 위치로부터 이동하는 것에 관한 공차를 의미하고, 기울기(a, β, v)는 각각의 축(x, y, z)에 대한 광학 면 또는 렌즈(그룹)의 회전을 의미한다. 즉, 단품공차에서의 편심은 렌즈 면간의 정점 차이를 의미하고, 취부공차에서의 편심은 광축에 대한 렌즈(그룹)의 벗어나는 정도를 의미한다. 그리고 단품공차에서의 기울기는 렌즈 면간의 상대적인 미소 회전량을 의미하고, 취부공차에서의 기울기는 광축에 대한 렌즈(그룹)의 미소 회전량을 의미한다.

한편, 단품공차에서의 z축 편심은 위에서 언급한 두께 공차와 같은 의미이고, 취부공차에서의 z축 편심은 렌즈간의 거리 공차이다. 광학 면이 대칭인 경우, v 기울기는 결상 성능에 영향을 미치지 않으므로 단품 및 취부공차 계산 시 제외하곤 한다.

실제, 편심과 기울기에 관계되는 공차는 계산은 가능하지만 각각을 분리하여 측정할 수 없기 때문에 제작 후 평가가 용이하지 않은 경우가 많다. 한 가지 대안으로써, 편심과 기울기가 발생하게 되면 광축방향으로 입사하는 빔이 편향(deviation)되므로 이를 측정하여 간접적으로 편심과 기울기의 발생 정도를 판단한다.

본 논문에서는 단품공차에서 일반적으로 발생할 수 있는 빔의 편향치를 참조하여 이에 대응되는 편심과 기울기를 산출하여 공차를 결정하였다. 널 렌즈의 편심과 기울기에 관련되는 취부공차는 정렬 시 조정에 의해서 오차를 보상해 나갈 예정이므로, 실제로는 공차로써의 역할보다는 여러 공차에 의한 수차를 보정하는 보상자(compensator)로써 기능하게 된다. 그리고 시험 비구면의 편심과 기울기는 가변 범위를 두어 여러 값들에 대해 계산함으로써 측정 정밀도의 한계를 결정하도록 하였다.

다음은 지금까지 논의된 공차 중 단품공차의 전형적인 크기를 표(표 1^[9])로 나타낸 것인데, 앞으로 논의될 공차계산에서 참조 값으로 활용할 예정이다.

표 1. 전형적인 공차량

| 단품공차 정밀도 | 면의 질(S&D) | 편향(min) | 두께(mm) | 곡률반경 | 불규칙도(Irregularity) |
|-------------|-----------|---------|------------|-------|--------------------|
| 저가형 | 120-80 | >10 | ± 0.5 | Gage | Gage |
| 상용 | 80-50 | 3-10 | ± 0.25 | 10 Fr | 3 Fr |
| 정밀 | 60-40 | 1-3 | ± 0.1 | 5 Fr | 1 Fr |
| 초정밀 | 60-40 | <1 | ± 0.05 | 1 Fr | 1/5 Fr |
| 플라스틱 | 80-50 | 1 | ± 0.02 | 10 Fr | 5 Fr |

이상과 같이 개별 공차에 대해서 서술을 진행하였고, 지금부터는 이를 가지고 실제 측정 정밀도의 한계를 구하는 공차 계산 방식에 대해서 중요 사항을 간략히 논의한다.

(1) 판단기준

설계 성능 대비 공차에 대해서 변화되는 성능의 저하를 판단하기 위해 파면수차, MTF, 기하적인 스폰의 크기 및 밀도 분포, PSF(point spread function)등 결상 성능을 나타내는 다양한 특성량이 고려될 수 있다. 본 논문에서는 이 중 RMS 파면수차의 변화치를 가지고 측정의 정밀도를 판단하는 기준으로 삼았다.

(2) 확률적인 성능예측 및 개별 공차의 확률분포

본 논문에서는 공차 발생시의 성능 변화를 예측하기 위해 code-v의 공차분석 기능을 사용하게 되는데, 출력 결과는 확률적으로 제시되므로, 성능의 판단은 3σ(99.9%)를 기준으로 한다. 여기서, 공차 계산 시 주의할 점은 개개의 공차들이 확률분포 대신에 양 끝점의 값만 사용하도록 하는 것이다. 왜냐하면, 개별 공차 값이 주어졌을 때, 이에 대응되는 신뢰할 수 있는 측정 정밀도의 한계를 결정하는 것이 목표이기 때문이다.

(3) 보상자

광학부품들의 조립 과정에서 움직일 수 있는 자유도를 보상자라고 하는데, 보상자는 광학계 내에 다수 개 존재할 수도 있고 혹은 없을 수도 있다. 예를 들면, 어떤 광학계를 조립할 때, 상면의 위치를 광축 방향 및 상하 좌우로 움직일 수 있으면 세 개의 보상자를 갖는 것으로 취급되어진다. 통상, 보상자는 단품공차 및 보상자를 제외한 취부공차에 의한 광학계의 성능 저하를 억제하는 역할을 함에 유의하기 바란다. 본 논문에서는 측정 정밀도의 한계를 극대화하기 위해, 보상자로써 개별 널 렌즈의 광축방향과 편심 및 기울기를 사용하기로 한다.

III. 자동무수차점 방식의 널 렌즈 설계

널 렌즈 설계에 있어서 자동무수차점 방식의 특징은 널 렌즈를 통과하면 광파면이 시험비구면의 형상과 같은 수차를 가지는 파면^[10]이 된다는 것이다. 이 파면이 시험 비구면에서 반사하여 되돌아 온 빛과 레이저에서 나와 기준 면에서 반사한 빛이, 만약 시험 비구면의 제작 오차가 있다면, 간섭하여 무늬를 만드는데, 이로부터 시험 비구면의 형상을 측정할 수 있는 방식이다(그림 1. 참조). 그리고 이 방식은 널 렌즈가 작아도 대형의 시험 비구면을 측정할 수 있다는 것이 장점이라는 것을 밝혀둔다.

그림 2는 자동무수차점 방식으로 설계된 실제의 비구면 측정용 2매 구성 널 렌즈 광학계이다. 본 설계의 특징은 그림 1의 전형적인 무수차점방식과는 달리 간섭계에서 출사되는

시준 빔을 첫 번째 널 렌즈에 의해서 수차를 가지는 점 형태로 결상시키고, 이를 양의 굴절능을 갖는 두 번째의 널 렌즈에 의해서 시험 비구면과 같은 형상의 비구면 파면으로 만드는 것이다. 본 설계에서 이와 같은 널 렌즈 구성을 채택한 이유는, 기존 방식(그림 1)으로는 3매의 널 렌즈 광학계를 구성하더라도 시험 비구면과 같은 비구면 파면을 만들 수 없었으므로, 측정 정밀도를 고려한다면 가급적 최소(1~2 매)의 매수로 널 렌즈 광학계를 구성하는 것이 필요하기 때문이다. 그림 2에서 보면 시험 비구면에서 반사되어 되돌아 온 빛이 2매의 널 렌즈를 다시 통과한 후, 이론적으로는 시준 광선으로 되어야 하지만, 점 결상하는 것으로 되어 있는데, 이는 시준 광선에 대해서 무수차로 점 결상 할 수 있도록 수차 평가를 하기 위해서 도입된 완전렌즈(perfect lens) 때문이다. 그리고 설계된 널 렌즈 각각의 앞면은 평면으로 되어 있는데, 이는 실제 시험 비구면 평가를 위하여 측정 장치를 구성할 때, 널 렌즈의 기울기 정렬을 용이하게 하기 위해서이다. 즉, 간섭계로부터 시준 된 입사 빔이 들어올 때, 두 번째 널 렌즈

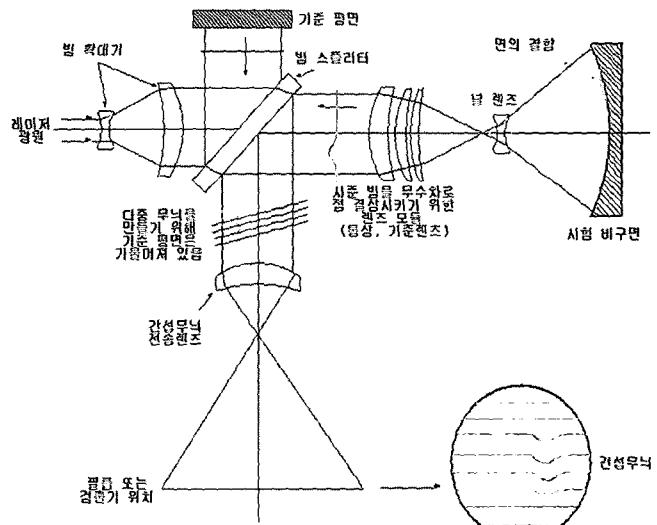


그림 1. 비구면 측정을 위한 자동무수차점 방식의 전형적인 구성도.

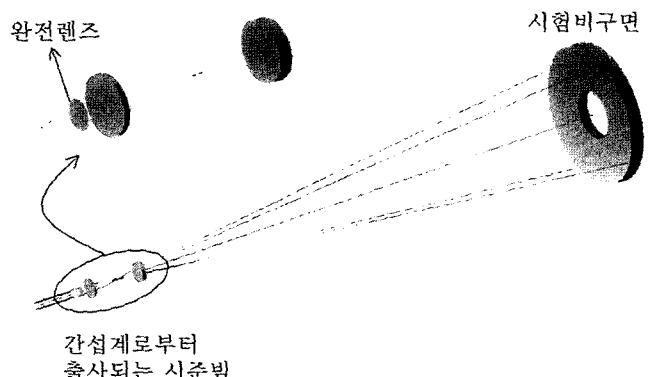


그림 2. 설계된 자동무수차점 방식의 널 렌즈.

표 2. 자동무수차점 방식의 장치 구성 데이터 (단위 : mm)

| 면 번호 | 곡률 반경 | 두께 | 재질 | 구경크기 |
|-------------------------|---|-----------------|-----|-------|
| 물체 | 평면 | ∞ (시준 빔) | - | - |
| 1(조리개) | 평면 | 10 | BK7 | 20.0 |
| 2 | -34.957 | 109.97 | | 20.0 |
| 3 | 평면 | 10 | BK7 | 15.33 |
| 4 | -138.307 | 1132.45 | | 17.38 |
| 5 (회전 대칭형 시험 비구면) | -1191.95 $K = 0.0$ A(4차) = $0.836897E-10 \text{ mm}^{-3}$ B(6차) = $0.238196E-16 \text{ mm}^{-5}$ C(8차) = $0.647310E-22 \text{ mm}^{-7}$ D(10차) = $-0.783186E-27 \text{ mm}^{-9}$ | -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 | ∞ | - | 20.0 |
| 상 | 평면 | 0 | - | - |

즈의 앞면(평면)을 이용하여 기울기 정렬을 하고, 이후 첫 번째 널 렌즈의 앞면을 이용하여 기울기를 정렬하는 방식이다. 그러면 전체 장치를 구성하는데 있어서 정렬의 자유도는 시험 비구면의 3축 방향 기울기(a, b, v)와 각 널 렌즈의 3축 방향 편심(x, y, z)만 남게 된다. 이에 더하여 널 렌즈의 앞면을 평면으로 만들면 렌즈 제작 시 면 간의 편심 및 기울기를 소거할 수 있을 뿐만 아니라 첫 번째 널 렌즈에서의 두께 변화에 따른 성능 변화도 최소화 할 수 있는 이점이 있다.

표 2에는 장치의 구성에 관계되는 데이터를 나타내었는데, 1, 2 면이 첫 번째 널 렌즈이고, 3, 4 면이 두 번째 널 렌즈이다. 이로부터 광축방향으로 1132.45 mm 떨어진 곳에 시험

비구면의 정점이 위치하는데, 면 5로 제시되어져 있다. 6~9 면은 시험 비구면에서 반사된 빛이 널 렌즈로 다시 되돌아오는 상황을 나타내는 데이터로써, 순서는 두 번째 널 렌즈에서 굴절한 후, 다시 첫 번째 널 렌즈로 입사하게 된다. 이후, 앞에서 설명했던 것처럼 시준 된 빔이 되는데, 이를 설계 편의를 위해 완전렌즈로써 결상시킨다.

그림 3은 자동무수차점 방식으로 설계된 널 렌즈에 의한 파면수차(출사동 상)를 나타낸 것으로써, P-V 값으로는 0.00053λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$)가 되는데, 거의 제로에 가까운 값을 가짐을 알 수 있다. 즉, 설계치대로 완벽히 널 렌즈가 만들어지고 정렬 오차가 없게 된다면, 측정의 정밀도는 거의 제로에 가까운 값 ($5.3\lambda/10000$)이 된다는 것이다.

한편, 그림 3의 중앙부는 겸게 표현되어 있는데, 이는 유효 구경이 아님을 나타낸 것으로써, 통상 대구경 반사경계에 있어서 주경의 중앙부가 뚫려 있음을 나타낸 것이다.

지금까지 보고 된 논문들의 주 관심사는 주로 널 렌즈 설계에 국한되어 있었으나, 본 논문에서는 제작 오차와 정렬 오차를 고려한 측정 정밀도를 다루기 위해 다음 절에서 이와 관련된 공차계산을 수행하고 분석한다.

IV. 측정 한계 정밀도를 결정하기 위한 공차분석

널 렌즈의 제작 및 측정 장치의 정렬이 완전하다면(설계치와 동일하다면), 측정 정밀도의 한계는 잔류 수차 값과 동일할 것이다. 즉, III절에서 제시된 바와 같이 본 논문의 널 렌즈계의 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 $2\lambda/10000$



그림 3. 널 렌즈의 출사동 상의 파면수차.

까지 얻을 수 없다는 것은 자명하다. 크게 두 가지 요인에 의해서 측정 정밀도는 저하하게 되는데 널 렌즈의 제작 오차와 정렬 정밀도이다. 일반적으로, 취부공차(널 렌즈의 편심 및 기울기, 광축방향의 이동)에 의해서도 측정 정밀도는 저하하게 되지만, 본 논문에서는 취부공차를 보상자로 두어 장치의 정렬 정밀도를 조정하는 인자로써 사용한다. 그러므로 측정 정밀도의 한계는 널 렌즈의 제작 특성에만 의존하게 되는데, 다음 표 3에 정밀 렌즈 제작 시 통상 발생할 수 있는 공차량을 제시해 놓았다. 표 3은 측정 정밀도의 한계를 계산하기 위한 공차량으로 사용한다.

표 3에서 제시하여 놓은 각 공차량들은 표 1을 참조하여 결정한 양들로써, 이 중 편심과 기울기량은 표 1의 편향 값을 참조하여 변환한 값임에 유의하기 바란다. $x(xz)$: 구결면 및 $y(yz)$: 자오면 방향의 편심 값과 $\alpha(x$ 축 방향의 기울기) 및 $\beta(y$ 축 방향의 기울기) 기울기는 각각 1분의 편향에 대응되는 값들로 별도 계산된 양들이다. 표 1에서는 정밀 렌즈의 총 편향 값이 1분으로 제시되어 있지만, 본 논문에서는 편향을 발생시킬 수 있는 개개의 공차에 의한 편향 값을 각각 1분으로 두었다.

표 4는 표 3의 단품공차가 널 렌즈에 발생한 경우, 개개 공차에 의한 성능의 변화(수차 발생)를 정리해 놓은 것이다. 설계 성능($2\lambda/10000$) 대비 각각의 공차에 의한 파면수차의 발

생량은 비교적 큰 값을 가지는데, 이는 널 렌즈가 설계 위치로 설치된 상황(정렬을 위한 조정을 하지 않은 경우)에서의 값들임에 유의하기 바란다. 표 4의 데이터가 가지는 의미는 크게 두 가지로 생각할 수 있는데, 첫째, 조정 전의 각 공차에 의한 수차 발생량을 살펴봄으로써 각 공차별 민감도를 파악하는 것이고, 둘째, 조정이 이루어진 경우 파면수차가 보정되는 정도를 살펴봄으로써 조정의 전략 및 정렬의 한계 정밀도를 파악하는 것이다.

표 5는 널 렌즈의 광축 방향 위치와 편심 및 기울기를 보상자로 두었을 때의(실 측정에서는 정렬을 위한 미세조정) 파면수차 변화량이다. 표 4와 비교해보면 특이점은 불규칙도(irregularity)를 제외한 나머지 공차들은 미세조정에 의해 파면수차가 보정된다는 것이다. 불규칙도는 정렬을 위한 조정 전후에 거의 변화를 보이지 않는 양으로써, 측정 정밀도의 한계를 결정짓는 중요한 요소라는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 측정 정밀도는 미세조정과 널 렌즈면의 정밀 제작에 의해 좌우된다는 것이다.

표 5의 전체 공차에 의한 파면수차의 RMS 발생량(3σ , 99.9%)은 약 $5\lambda/100(0.05\lambda)$ 임을 밝혀두고, 이때 널 렌즈의 설계위치를 기준으로 미세 조정된 항목 및 크기를 표 6에 제시한다. 표 6은 측정 장치를 구성할 때, 기구부의 조정 범위를 설정하기 위한 기초 자료로써 유용하게 활용될 수 있다.

표 3. 널 렌즈의 제작 오차

| レンズ 단품공차 | 널 렌즈 1 | | 널 렌즈 2 | | 시험비구면 |
|-------------------|--------|-------|--------|-------|-------|
| | 앞면(평면) | 뒷면 | 앞면(평면) | 뒷면 | |
| 곡률반경(fringe) | ±0.1 | ±1.0 | ±0.1 | ±1.0 | |
| 불규칙도(fringe) | ±0.02 | ±0.2 | ±0.02 | ±0.2 | |
| x방향 편심(mm) | | ±0.02 | | ±0.08 | |
| y방향 편심(mm) | | ±0.02 | | ±0.08 | |
| α 기울기(min) | | ±0.7 | | ±0.7 | ±1.0 |
| β 기울기(min) | | ±0.7 | | ±0.7 | ±1.0 |
| 굴절률 | ±0.001 | | ±0.001 | | |
| 두께(mm) | ±0.05 | | ±0.05 | | |

표 4. 파면수차의 RMS 변화 (정렬을 위한 조정 전)

| レンズ 단품공차 | 널 렌즈 1 | | 널 렌즈 2 | | 시험 비구면 | |
|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--|
| | 파면수차의 RMS 변화 | | 파면수차의 RMS 변화 | | | |
| | 앞면(평면) | 뒷면 | 앞면(평면) | 뒷면 | | |
| 곡률반경 | 0.0053 λ | 0.1200 λ | 0.0116 λ | 0.1155 λ | | |
| 불규칙도 | 0.0010 λ | 0.0222 λ | 0.0020 λ | 0.0209 λ | | |
| x방향 편심 | | 0.0758 λ | | 0.1811 λ | | |
| y방향 편심 | | 0.0758 λ | | 0.1811 λ | | |
| α 기울기 | | 0.0277 λ | | 0.0656 λ | 0.6986 λ | |
| β 기울기 | | 0.0277 λ | | 0.0656 λ | 0.6986 λ | |
| 굴절률 | 0.5680 λ | | 0.0912 λ | | | |
| 두께 | 0.0000 λ | | 0.3224 λ | | | |

표 5. 파면수차의 RMS 변화 (정렬을 위한 조정 후)

| 단품공차 | 렌즈 | 널 렌즈 1 | | 널 렌즈 2 | | 시험 비구면 | |
|--------------|----|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--|
| | | 파면수차의 RMS 변화 | | 파면수차의 RMS 변화 | | | |
| | | 앞면(평면) | 뒷면 | 앞면(평면) | 뒷면 | | |
| 곡률반경 | | 0.0000 λ | 0.0000 λ | 0.0000 λ | 0.0001 λ | | |
| 불규칙도 | | 0.0010 λ | 0.0194 λ | 0.0018 λ | 0.0176 λ | | |
| x방향 편심 | | | 0.0000 λ | | 0.0000 λ | | |
| y방향 편심 | | | 0.0000 λ | | 0.0000 λ | | |
| α 기울기 | | | 0.0000 λ | | 0.0000 λ | 0.0000 λ | |
| β 기울기 | | | 0.0000 λ | | 0.0000 λ | 0.0000 λ | |
| 굴절률 | | 0.0000 λ | | 0.0001 λ | | | |
| 두께 | | 0.0000 λ | | 0.0000 λ | | | |

표 6. 설계 위치를 기준으로 미세 조정된 양(설계된 RMS 파면수차 : $2\lambda/10000$, 미세조정 후의 RMS 파면수차 : 약 $5\lambda/100$)

| 미세조정 | 렌즈 | 널 렌즈 1 | | 널 렌즈 2 | |
|--------------------|----|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|
| | | 앞면 | 뒷면 | 앞면 | 뒷면 |
| x방향 편심 (mm) | | ± 0.3526 | | ± 0.1423 | |
| y방향 편심 (mm) | | ± 0.2419 | | ± 0.2433 | |
| 광축방향(z축) 조정 (mm) | | ± 0.1792 | (널 렌즈 1과 널 렌즈 2 사이의 거리) | ± 0.3761 | (널 렌즈 2와 시험비구면 사이의 거리) |
| α 기울기 (rad) | | ± 0.0043 | | ± 0.0014 | |
| β 기울기 (rad) | | ± 0.0061 | | ± 0.0018 | |

한편, 표 3에서 널 렌즈와는 별도로 시험비구면의 기울기 양 정렬을 1분으로 설정하여 놓았는데, 실제 측정에 있어서 시험비구면의 정렬 정도의 범위를 가늠하기 위해 표 7과 같이 여러 기울기양에 대해서 파면수차의 발생량을 살펴보았다. 표 7은 널 렌즈의 미세조정이 있을 때, 당초 정의된 1분 (표 3 참조)보다 큰 4분까지 전체 파면수차의 변화량이 나타나지 않음을 보이고 있다. 기울기양이 5분부터는 약간의 변화를 보이기 시작하여 6분이 되면 급격히 파면수차의 발생량이 증가하므로 시험 비구면은 4분 내로 정렬되어야 함을 확인할 수 있었다. 여기서, 시험비구면의 기울기만 다루었는데, 편심의 경우는 널 렌즈를 미세 조정함에 의해 충분히 보상될 수 있으므로 제외하였음을 유의하기 바란다.

앞의 표 5에서 살펴본 바와 같이, 널 렌즈의 불규칙도가

측정 정밀도의 한계를 결정하는 중요한 요소이므로 각각의 널 렌즈별 불규칙도에 의한 파면수차의 변화 및 파면수차의 총 변화를 표 8에 제시한다.

표 8을 살펴보면 널 렌즈의 정밀 제작에 의한 불규칙도를 제거하면 할수록, 측정 정밀도의 한계는 높아짐을 알 수 있다. 불규칙도가 0.2 fringe가 되면 측정 정밀도의 한계는 약 $5\lambda/100$ 정도가 되고, 만약 측정 정밀도를 $\lambda/100$ 까지 높이고자 할 때는 불규칙도를 0.05 fringe($5/100$ fringe)까지 제작할 수 있어야 한다. 더 나아가서 불규칙도를 0.001 fringe($1/1000$ fringe)까지 제작을 하더라도 0.01 fringe($1/100$ fringe)의 불규칙도를 갖는 경우와 측정 정밀도에는 큰 변화가 없기 때문에 널 렌즈에 의한 측정 정밀도의 한계는 $4\lambda/1000$ 라는 중요한 결론을 내릴 수 있다.

표 7. 시험 비구면의 정렬정도에 따른 파면수차의 RMS 변화

| α 및 β 기울기 (min.) | 시험 비구면 | |
|-------------------------------|---|------------------------------|
| | α 및 β 기울기에 의한 파면수차의 RMS 변화 (λ) | 총 파면수차의 RMS 변화 (λ) |
| 1 | 0.0000 | 0.0454 |
| 2 | 0.0000 | 0.0454 |
| 3 | 0.0000 | 0.0454 |
| 4 | 0.0000 | 0.0454 |
| 5 | 0.0277 | 0.0532 |
| 6 | 0.6524 | 0.6540 |

표 8. 널 렌즈의 불규칙도에 의한 파면수차의 RMS 변화

| 뒷면(볼록면)의 불규칙도 | | 파면수차의 RMS 변화 (λ) | | 총 파면수차의 RMS 변화 (λ) |
|---------------|--------------|----------------------------|--------|------------------------------|
| 널 렌즈 1 | 널 렌즈 2 | 널 렌즈 1 | 널 렌즈 2 | |
| 0.20 fringe | 0.20 fringe | 0.0194 | 0.0176 | 0.0454 |
| 0.15 fringe | 0.15 fringe | 0.0145 | 0.0132 | 0.0342 |
| 0.10 fringe | 0.10 fringe | 0.0097 | 0.0088 | 0.0230 |
| 0.05 fringe | 0.05 fringe | 0.0048 | 0.0044 | 0.0121 |
| 0.01 fringe | 0.01 fringe | 0.0010 | 0.0009 | 0.0043 |
| 0.005 fringe | 0.005 fringe | 0.0005 | 0.0004 | 0.0036 |
| 0.001 fringe | 0.001 fringe | 0.0001 | 0.0001 | 0.0033 |

V. 결 론

본 논문에서는 대구경 비구면을 측정하기 위한 자동무수차점 방식의 2매 구성 널 렌즈를 설계하였고, 이로부터 널 렌즈의 제작 공차와 측정 정밀도와의 관계를 분석하였다. 널 렌즈의 제작 시 발생할 수 있는 다양한 공차량 중 널 렌즈면의 불규칙도(irregularity)가 측정 정밀도의 한계를 결정짓는 가장 주요한 공차 요소라는 것을 계산 및 분석을 통해 확인 할 수 있었다. 결과적으로, 본 논문에서 측정 하고자 하는 비 구면의 측정 정밀도는 $5\lambda/100$ (불규칙도 0.2 fringe)~ $4\lambda/1000$ 정도(불규칙도 0.01에서 0.001 fringe) 범위내로 한정된다는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문의 가장 큰 의미는 널 렌즈 방식으로 측정되는 비 구면들에 있어서 신뢰할 수 있는 정밀도의 한계를 제시할 수 있었다는 것이다. 앞으로의 연구는, 측정을 위하여 기 제작된 널 렌즈를 가지고 간섭계를 사용하여 불규칙도를 얻고, 이를 측정 정밀도의 한계 분석에 사용하는 것인데, 빠른 시 일 내에 연구를 진행하여 발표하도록 하겠다.

참고문헌

- [1] D. Malacara, *Optical Shop Testing*, 2nd Ed., (Jhon Wiley and Sons, New York, 1992).
- [2] 김연수, 김병윤, 이윤우, “타원면경 측정 Null 렌즈 설계,” *한국광학회지*, 제11권 4호, pp. 246-249, 2000.
- [3] 김연수, “비구면 측정 null 렌즈 설계 연구,” *한국과학기술원, 박사학위논문*, 2002.
- [4] 이종웅, “비구면 검사용 null 광학계의 설계,” *제10회 광기술 워크샵 논문집*, pp. 25-41, 2000.
- [5] 김연수, 김병윤, 이윤우, “쌍곡면 측정 null 렌즈 설계,” *한국광학회지*, 제12권 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] 임천석, 조재홍, 장수, 광학설계 과정을 위한 *code V*, (다성출판사, p. 96, 2001).
- [8] 임천석, 기하광학 (테크미디어, chap 6, 2003).
- [9] Warren J. Smith, *Modern Optical Engineering*, (McGraw-Hill Co., pp. 559-572, 2000).
- [10] 이종웅, “대구경 비구면 검사를 위한 null 광학계의 설계 및 평가 기술 연구,” *표준과학연구원 기본연구보고서*, (표준과학연구원, 대전, 2002).

**A study for null lens design of autostigmatic type and the limitation of measurement accuracy
for ultra precision manufacturing of large aspherical surface**

Kil Seon Kim[†] and Cheon seog Rim

Applied Optics and Electromagnetics, School of Natural Sciences, Hannam University, Daejon 306-791, Korea

[†]E-mail: roadsunny@empal.com

(Received June 7, 2004, Revised manuscript October 13, 2004)

A null lens system of autostigmatic type, consisting of two mirrors, is designed for testing a large aspherical mirror. The system is theoretically analyzed to determine the limitation of measurement accuracy according to the manufacturing and alignment errors. We confirmed that irregularity of the null lens surface is the principal factor among tolerances in limiting measurement accuracy. Consequently, we can predict that measurement accuracy will be from $5\lambda/100$ to $4\lambda/1000$ according to the amount of this irregularity. That is, we can present the limitation of possible measurement accuracy with actual alignment and manufacturing errors.

OCIS Codes : 120.6650, 220.1250, 220.3620, 220.4840.