

2축 총밀리기 간섭계의 계통오차 보정

이혁교 · 김승우[†]

한국과학기술원 기계공학과

Ⓣ 305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

(2001년 12월 21일 받음, 2002년 2월 25일 수정본 받음)

비구면 광학부품의 수차 측정 및 성능 평가를 위해 특별 설계된 총밀리기 간섭계를 소개하고, 이와 더불어 총밀리기 간섭계가 갖는 자체의 계통오차를 측정결과로부터 제거하기 위한 보정 방법을 제안한다. 총밀리기 간섭계의 계통오차는 크게 간섭광학계가 갖는 광학오차와 간섭계의 기구부의 불완전에 기인한 총밀리기 방향의 직교오차로 구분할 수 있다. 이들 두 계통오차들은 모두 본 논문에서 제안하는 방법으로 모두 보정될 수 있다. 보정 방법은 측정 대상물을 간섭계의 광축을 중심으로 회전하여 측정결과로부터 계통오차를 분리하는 자가보정 원리에 근거한다.

주제어 : Self-calibration, Lateral shearing interferometer, Systematic error, Zernike polynomials.

I. 서 론

마이클슨(Michelson), 피조우(Fizeau), 그리고 마하-젠더(Mach-Zender)를 포함한 대부분의 간섭계들은 검사의 대상이 되는 측정파면(measurement wavefront)을 일정한 정밀도를 갖춘 기준파면(reference wavefront)과 비교하여 측정파면이 갖는 오차를 측정한다.^[1] 반면 총밀리기 간섭계(lateral shearing interferometer)는 별도의 기준파면이 없이 측정파면만을 이용하여 오차를 측정한다. 구체적으로는 검사 대상의 측정파면을 두 개의 동일한 파면으로 분할한 후, 이중 하나의 측정파면을 횡방향으로 총밀림한 후 이를 다시 원래의 측정파면과 혼합하여 간섭을 일으킨다. 이때 얻어지는 간섭무늬는 측정파면의 기울기에 해당되는 정보를 제공하게 되며, 이를 전체의 측정영역에서 적분하면 원하는 측정파면의 오차를 얻게된다. 이러한 총밀리기 간섭계는 정밀한 기준파면을 얻기 어려운 비구면의 검사에 유용하게 이용될 수 있다.^[2-4]

본 논문에서는 먼저 CD와 DVD 픽업 비구면 렌즈의 검사를 위해 특별히 설계된 총밀리기 간섭계를 소개한다. 본 총밀리기 간섭계는 비구면 렌즈를 투과한 측정파면을 동일한 두 파면으로 분리한 후 이들 자체의 간섭을 이용하여 측정을 수행한다. 이로 인해 기준광학면을 필요로 하지 않으며 비교적 간단한 광학계로 간섭계의 구성이 가능하다. 그러나 총밀리기 간섭계에서 직접적으로 얻어지는 간섭무늬는 측정파면의 기울기 정보에 해당되고, 이로부터 파면을 복원하는 과정에서 국부적으로 존재하는 측정오차가 측정결과 전체에 대해 확산되는 문제점을 갖는다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 간섭계의 시스템오차를 최소화하여야 하는 당면성을 갖게 된다. 본 연구에서는 총밀리기 간섭계에 존재하는 시스템오차를 직접 보정함으로써 측정 정도를 기존의 피조우 간섭계 수준으로 향상시키는 방법을 제안한다. 이는 측정파면만을 광축에 대해 회전시킴

으로써 측정파면과 시스템오차를 분리하는 자가보정 원리^[5,6]를 이용하며, 이를 통해 2축 총밀리기 간섭계의 시스템오차와 x와 y의 총밀림 방향이 갖는 불완전한 수직 정밀도에서 발생되는 직교오차^[7]를 효율적으로 보정할 수 있음을 보인다.

II. 총밀리기 간섭계

총밀리기 간섭계는 그림 1에서와 같이 원래의 측정파면 $W(x,y)$ 와 이를 횡방향으로 일정량 총밀림 이동시킨 파면을 중첩한다. 이때 얻어지는 간섭무늬는 두 파면의 위상 차 ΔW 에 의해 결정되며, 총밀림량 s 가 작은 양이라고 가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta W(x,y) = W(x,y) - W(x-s,y) \approx \frac{\partial W(x,y)}{\partial x} \cdot s \quad (1)$$

위 식에서와 같이, 총밀리기 간섭계에서 간섭무늬를 통해 얻어

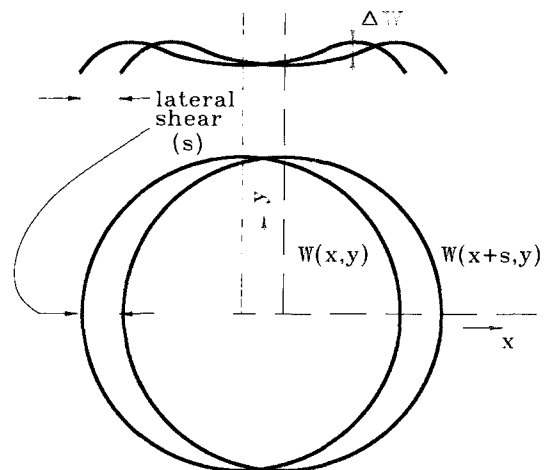


그림 1. 총밀리기 간섭계의 총밀림된 두 파면.

[†]E-mail: swk@kaist.ac.kr

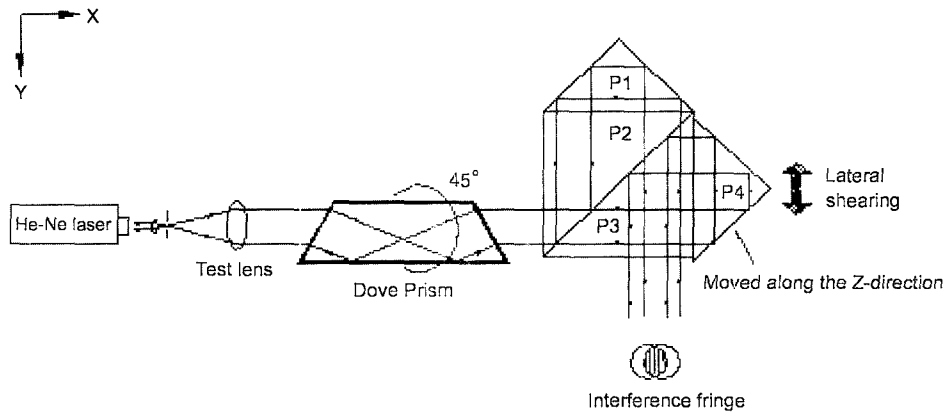


그림 2. 도브 프리즘을 이용한 2축 증밀리기 간섭계.

지는 위상은 측정파면 자체의 위상이 아니라 측정파면의 증밀림 방향으로 갖는 파면의 기울기에 대한 위상임을 알 수 있다. 이렇게 얻어진 기울기 위상으로부터 원하는 측정파면 W 의 위상을 복원하기 위해서 Zonal 방법과 Modal 방법이 널리 사용되고 있다. Zonal 방법은 측정파면의 원래의 위상과 간섭부너에서 얻어진 기울기의 위상과의 관계를 이산 모뎀 형태의 추정식으로 가정 한 후, 이들 추정식 계수들을 실제 획득된 파면의 기울기 정보로부터 최소자승법에 의해 결정한다.^{18,111} 반면, Modal 방법은 Zernike 다항식과 같은 수학적으로 잘 정의된 기저함수를 선택한 후, 이들 기저함수의 계수들이 획득된 기울기 위상을 최적으로 만족하도록 최소자승법을 통해 결정한다.^{19,111} 일반적으로 전자의 방법과 비교하여 후자의 방법은 계산량이 적다는 장점을 갖는다. 이와 더불어, Zernike 다항식을 기저함수로 선택할 측정파면이 갖는 수치를 직접적으로 얻을 수 있는 추가적인 이점이 있어 본 연구에서 채택되었다.

그림 2는 본 연구에서 대상으로 하는 증밀리기 간섭계의 구성을 보여준다. 광원은 타원보정된 635 nm 중심파장을 갖는 레이저 다이오드가 사용되었다. 광원으로부터의 레이저 빔은 현미경 대물렌즈를 통해 핀홀로 집광된 후 측정대상물인 CD 픽업렌즈를 통과하게 된다. 픽업렌즈 전단의 디스크는 픽업렌즈에 기능을 위해 의도적으로 부여된 구면수차를 사전에 제거하기 위해 삽입되어 있다. 픽업렌즈를 통과한 레이저 빔은 수차가 없는 경우 완전 평면파의 측정파면을 형성하게 된다. 이를 검사하기 위한 목적으로 측정파면은 다시 도브프리즘을 거쳐 4개의 프리즘 조합을 통과하게 된다. 도브프리즘은 입력되는 레이저 빔을 임의의 각도로 회전하기 위해 사용된다. 도브프리즘을 α 도 회전하면 출력 광은 입력광에 대하여 2α 도 만큼 회전한다. 다음에 위치한 프리즘 조합은 측정파면의 분할과 증밀리기와 위상천이를 동시에 구현하기 위해 제작되었으며, P1, P2, P3, P4의 4개의 독립적인 프리즘으로 구성된다. 중앙에 위치한 프리즘 P3는 고정되어 있으며, 이를 기준으로 다른 세 개의 프리즘은 오일을 통해 부착되어 각각 미끄럼 운동에 의한 상대운동을 할 수 있게 되어 있다. 사용된 오일은 프리즘과 동일한 굴절률을 갖도록 선정되었다. 프리즘 P2은 PZT에 의해 좌우로 이동되며, 이 결과 P1이 상하운동을 하게

되고 결과적으로 P3 경사면에서 반사한 하나의 측정파면에 대해 광경로차를 부여하여 위상천이를 일으킨다. 프리즘 P4는 상하로 이동되며 이로 인해 P3 경사면을 통과한 또 다른 하나의 측정파면에 증밀림을 유도한다. 결과적으로 프리즘 조합을 통과하면서 P3 경사면에서 분할된 두 개의 동일한 측정파면들은 일정한 증밀림 간섭을 일으키고 이때의 간섭부너는 CCD 수광소자를 이용해 관측된다. 그리고 최종적으로 P2의 미소구동에 의한 위상천이 방법을 통해 간섭부너의 위상을 얻게 된다.

III. 시스템오차 자가보정

앞서 설명한 증밀리기 간섭계에서 x축 방향으로 증밀림하여 최종적으로 측정된 기울기 위상을 W_x 라고 하면, 이는 간섭계가 갖는 시스템오차를 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.¹²¹

$$W_x = T + P \tag{2}$$

즉, 측정된 위상 W_x 는 실제 원하는 참값의 기울기 P 와 간섭계 자체가 갖는 수차나 정렬오차 등으로 인한 시스템오차 T 의 합으로 나타난다. 자가보정법은 측정된 W_x 로부터 T 를 분리하여 궁극적으로 참값 P 만을 얻고자 한다. 이를 위해 측정파면을 도브프리즘을 이용하여 광축을 중심으로 일정 각도로 회전시킨다. 이 경우 시스템오차 T 는 측정파면의 회전에 무관하게 고정되어 있는 반면, P 만이 회전하게 된다. 이러한 회전에 의한 파면의 변화를 수학적으로 모델링하기 위해서는 원통형 좌표계를 사용한다. 그리고 Zernike 다항식을 이용해서 다음과 같이 P 를 모델링한다.

$$P(r, \theta) = \sum_{l,k} R_l^k(r) [c_{lk} \cos(k\theta) + d_{lk} \sin(k\theta)] \tag{3}$$

위 식에서 $R_l^k(r)$ 은 Zernike 다항식의 반경방향 성분을 의미하며, c_{lk} , d_{lk} 는 각각 Zernike 계수들을 의미한다. 자가보정을 위해 여러 번의 측정파면의 회전이 요구되며, 이때의 회전각을 $\alpha_j (j = 0, 1, \dots, M)$ 로 표시한다. 그러면 α_j 만큼 회전한 파면은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P(r, \theta + \alpha_j) = \sum_{l,k} R_l^k(r) [c_{lk} \cos(k(\theta + \alpha_j)) + d_{lk} \sin(k(\theta + \alpha_j))] \\ = \sum_{l,k} R_l^k(r) [c'_{lk} \cos(k\theta) + d'_{lk} \sin(k\theta)] \quad (4)$$

where and $c'_{lk} = c_{lk} \cos(k\alpha_j) + d_{lk} \sin(k\alpha_j)$ and $d'_{lk} = d_{lk} \cos(k\alpha_j) - c_{lk} \sin(k\alpha_j)$.

시스템오차 T 는 회전에 대하여 불변인 특성을 갖는다, 즉, $T(r, \theta + \alpha_j) = T(r, \theta)$. 이러한 특성을 이용하여 회전된 W_x 와 초기의 W_x 의 차를 D 로 정의하면, T 항을 소거되어 회전량 α_j 만의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$D(r, \theta + \alpha_j) = W_x(r, \theta + \alpha_j) - W_x(r, \theta) \\ = P(r, \theta + \alpha_j) - P(r, \theta) = P(r, \theta) [\cos(k\alpha_j) - 1] + \tilde{P}(r, \theta) \sin(k\alpha_j) \quad (5)$$

위식에서 새로이 도입된 변수 $\tilde{P}(r, \theta)$ 는 $P(r, \theta)$ 의 가상적으로 정의되는 공액 파면이며, 수식적으로는 다음과 같다. 즉, $\tilde{P}(r, \theta) = \sum_{l,k} R_l^k(r) [d_{lk} \cos(k\theta) - c_{lk} \sin(k\theta)]$. 파면차 D 는 회전의 전후에 실제로 측정된 W_x 들로 계산될 수 있으며 이를 표시한다. 그리고 로부터 P 를 얻기 위해서는 최소자승법을 도입한다. 이를 위해 다음과 같은 오차함수를 정의한다.

$$E(r, \theta) = \sum_{j=0}^{N-1} \{D(r, \theta + \alpha_j) - \hat{D}(r, \theta + \alpha_j)\}^2 \\ = \sum_{j=0}^{N-1} \{P(r, \theta) [\cos(k\alpha_j) - 1] + \tilde{P}(r, \theta) \sin(k\alpha_j) - \hat{D}(r, \theta + \alpha_j)\}^2 \quad (6)$$

그리고 위식의 오차함수가 최소값을 갖게 될 때의 필요조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial E(r, \theta)}{\partial P(r, \theta)} = \frac{\partial E(r, \theta)}{\partial \tilde{P}(r, \theta)} = 0 \quad (7)$$

위의 필요조건을 식 (6)에 적용하여 미분을 수행하고 이의 결과를 수학적으로 정리하면, 상기 두 개의 필요조건은 다음의 두개의 선형방정식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{N-1} [\cos(k\alpha_j) - 1]^2 & \sum_{j=0}^{N-1} \sin(k\alpha_j) [\cos(k\alpha_j) - 1] \\ \sum_{j=0}^{N-1} \sin(k\alpha_j) [\cos(k\alpha_j) - 1] & \sum_{j=0}^{N-1} \sin^2(k\alpha_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(r, \theta) \\ \tilde{P}(r, \theta) \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{N-1} \hat{D}(r, \theta + \alpha_j) [\cos(k\alpha_j) - 1] \\ \sum_{j=0}^{N-1} \hat{D}(r, \theta + \alpha_j) \sin(k\alpha_j) \end{bmatrix} \quad (8)$$

결국 임의의 좌표값 (r, θ) 에 대하여 상기 두 선형 방정식으로

부터 시스템오차가 제거된 파면의 기울기의 참값 $P(r, \theta)$ 를 얻게된다. 이때 필요한 파면 회전의 최소 수는 $N=2$ 가 되며, 이 경우 초기의 파면과 일회 회전된 두개의 파면만으로 자가보정이 가능하게 된다. 또한 파면의 회전수 N 이 증가할수록 평균 효과에 의해 정밀한 결과를 얻게 되나, N 이 증가하면 연산량도 증가하므로, 실제로는 $N=4-6$ 이 이상적인 회전의 수가 된다. 한 예로 $N=4$ 면, 회전각은 초기의 0도 함께, 90, 180, 270도의 90도 간격으로 회전하게 된다. 또 한가지 중요한 사실은 상기 식 (8)로 표현된 자가보정의 알고리즘은 회전각 α_j 가 반드시 등간격일 필요가 없다. 즉, 임의의 회전각을 자가보정에 이용할 수 있는 장점을 제공한다. 그리고 이는 기존에 발표된 Fritz의 2회전 방법과 Evans의 평균법^[6]을 모두 포괄하는 가장 일반적인 자가보정 알고리즘이라 할 수 있다.

IV. 직교오차의 보정

시스템오차가 제거된 파면은 층밀리기 간섭계에서 궁극적으로 얻고자 하는 비구면 렌즈를 통과한 측정파면의 기울기 정보만을 제공한다. 그러므로 층밀리기 간섭계에서 얻어진 기울기 정보로부터 측정파면을 복원하는 과정이 필요하다. 이를 위해서는 측정파면의 기울기 정보가 x축 뿐 아니라 이에 수직이 되는 y축의 방향으로도 요구된다.^[7] 다시 말해 x축 방향으로 층밀림을 하여 기울기 파면을 측정한 후, 다시 y축의 방향으로도 층밀림을 일으켜 동일한 측정을 반복하여야 한다. 일반적인 층밀림 간섭계와는 달리 본 연구에서 제안된 그림2의 층밀리기 간섭계는 이러한 2축의 층밀림을 유도하는데 큰 장점을 갖는다. 즉, x축과 y축으로 별도의 층밀림을 일으킬 필요가 없이, 단순히 도브프리즘만을 45도 회전하면 x축의 층밀림 간섭이 y축의 층밀림으로 전환된다. 이를 다시 앞 절에서 설명한 회전에 의한 자가보정법과 연계 시키면 다음의 같이 설명할 수 있다.

$$P(r, \theta) = \frac{\partial W}{\partial x} \quad \text{and} \quad P(r, \theta + \pi/2) = \frac{\partial W}{\partial y} \quad (9)$$

그러나 문제는 y축 층밀림을 유발하기 위해 도브프리즘을 회전하는 과정에서 정확하게 파면을 90도 회전시킬 수 있는가 하는 문제가 남는다. 실제로는 도브프리즘의 회전시 회전오차가 필연적으로 수반되고 이는 궁극적으로 측정파면의 복원에 큰 오차를 야기한다. 이러한 문제점은 다행히 $P(r, \theta)$ 와 이를 α_j 만큼 회전한 파면 $P(r, \theta + \alpha_j)$ 가 서로 독립적이지 아니고 식 (4)와 같은 특수한 관계를 갖는다는 사실을 이용하면 해결할 수 있게 된다. 다시 말해 $P(r, \theta)$ 와 $P(r, \theta + \alpha_j)$ 가 주어지면 정확한 회전각 α_j 를 역으로 계산할 수 있게 된다. 이를 위해 다음과 같은 오차함수를 정의한다.

$$F(\alpha_j) = \sum_{i=0}^{n-1} \{D(r, \theta + \alpha_j) - \hat{D}(r, \theta + \alpha_j)\}^2 \\ = \sum_{i=0}^{n-1} \{P(r, \theta) (\cos(k\alpha_j) - 1) + \tilde{P}(r, \theta) \sin(k\alpha_j) - \hat{D}(r, \theta + \alpha_j)\}^2 \quad (10)$$

식에서 $\sum_{i=0}^{n-1}$ 은 파면을 (r, θ) 좌표계에서 수치적으로 n 개의 독립된 위치의 점들의 값으로 적분함을 의미한다. 그리고 위의 오차함수가 회전각 α_j 에 대하여 최소값을 갖기 위한 필요조건은 다음과 같이 쓰여 질 수 있다.

$$\frac{\partial F(\alpha_j)}{\partial \cos(k\alpha_j)} = \frac{\partial F(\alpha_j)}{\partial \sin(k\alpha_j)} = 0 \quad (11)$$

위의 두 필요조건을 정리하면 다음의 두개의 선형방정식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{n-1} P(r, \theta)P(r, \theta) & \sum_{i=0}^{n-1} P(r, \theta)\tilde{P}(r, \theta) \\ \sum_{i=0}^{n-1} P(r, \theta)\tilde{P}(r, \theta) & \sum_{i=0}^{n-1} \tilde{P}(r, \theta)\tilde{P}(r, \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(k\alpha_j) \\ \sin(k\alpha_j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{n-1} \{\hat{D}(r, \theta + \alpha_j)P(r, \theta) + P(r, \theta)P(r, \theta)\} \\ \sum_{i=0}^{n-1} \{\hat{D}(r, \theta + \alpha_j)\tilde{P}(r, \theta) + P(r, \theta)\tilde{P}(r, \theta)\} \end{bmatrix} \quad (12)$$

결국 상기 두 선형 방정식을 해인 $\cos(k\alpha_j)$ 와 $\sin(k\alpha_j)$ 구한 후 회전각 α_j 의 참 값은 다음과 같이 결정된다.

$$\alpha_j = \frac{1}{k} \tan^{-1} \left[\frac{\sin(k\alpha_j)}{\cos(k\alpha_j)} \right] \quad (13)$$

위의 과정을 이용하면 90도의 정확한 회전 여부를 판정할 수 있게 되며, 결국 회전의 오차량 ϵ 도 구할 수 있다. 그리고 최종적으로 y축으로의 층밀리기 파면을 다음과 같이 보정할 수 있게 된다.

$$\frac{\partial W}{\partial y} = P\left(r, \theta + \frac{\pi}{2} + \epsilon\right) \quad (14)$$

V. 검증 실험

먼저 앞 절에서 제안한 시스템오차의 회전에 의한 자가보정 방법을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 3은 1에서부터 5차항까지 21개 Zernike 계수를 모두 0.1λ로 가정한 가상의 시스템오차 파면 T를 가정한 다음 이를 자가보정에 의해 제거한 시뮬레이션의 결과를 보여 준다. 시뮬레이션에서 회전회수 N은 6회로 잡았으며 회전량도 $\alpha_j = 0^\circ, 61^\circ, 121^\circ, 179^\circ, 241^\circ, 299^\circ$ 와 같이 $\pm 1^\circ$ 의 회전오차를 실었다. 그림 3(a)는 가상의 시스템 오차 T를 보여주며, 그림 3(b)는 기존의 자가보정법^{5,6)}을 적용한 결과, 그리고 그림 3(c)는

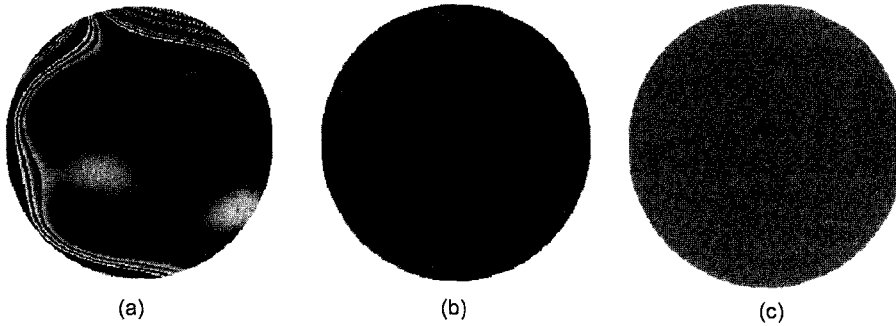


그림 3. 가상의 시스템 오차에 대한 자가 보정법의 적용 결과. (a) Simulated systematic error (PV: 1.118 μm, RMS: 0.110λ), (b) Residual error after previous calibration (PV: 0.017 μm, RMS: 0.001λ), (c) Residual error after suggested calibration (PV: 0.001 μm, RMS: 3×10⁻⁷ λ).

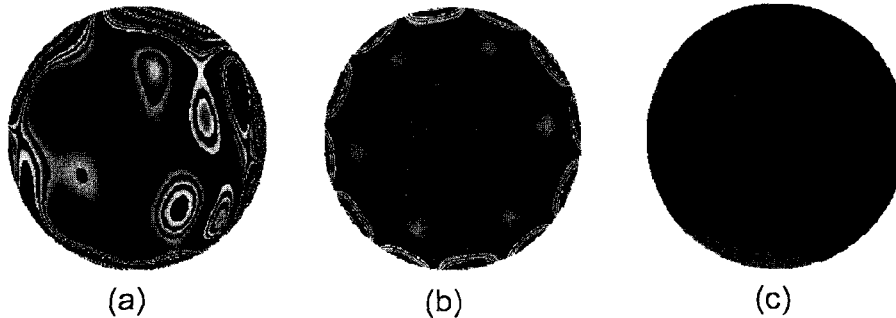


그림 4. 고주파 시스템 오차($k \geq 6$)에 대한 자가 보정법의 적용 결과. (a) Simulated systematic error (PV: 1.763 μm, RMS: 0.110λ), (b) Residual error after previous calibration (PV: 0.409 μm, RMS: 0.001λ), (c) Residual error after suggested calibration (PV: 0.012 μm, RMS: 2×10⁻⁵ λ).

본 논문에서 제안하는 자가보정법을 적용해서 계통오차를 제거한 결과를 보여준다. 결론적으로 본 논문에서 제안한 자가보정 방법이 시스템오차를 1/1000 이하의 수준으로 보상할 수 있음을 입증하였다.

그림 4는 그림 3과 동일한 조건에서 시스템오차 파면 T를 1에서 8차항까지 모든 Zernike 계수가 0.1λ로 가정한 시스템오차에 대한 보정 결과다. 이 경우에는 기존의 방법으로는 보정이 불가능한 고주파수 성분의 시스템오차가 많음에도 불구하고 1/100 이하의 수준으로 보정할 수 있음을 알 수 있다.

그림 5는 시스템오차 T에 랜덤 성분이 주도적일 경우의 보정 결과를 보여준다. 시뮬레이션은 앞과 동일한 가상의 파면을 만들고 파면 PV값의 3% 크기를 갖는 랜덤오차를 실어서 수행하였다. 본 문에서 제안하는 자가보정법은 랜덤오차에는 근원적으로 효과가 없다. 그러나 최소자승법을 적용하는 과정에서 평균효과에 의해 랜덤오차도 어느 정도 감소됨을 알 수 있다.

그림 6은 직교오차에 대한 시뮬레이션 결과를 보여 준다. 1에서 5차항까지의 모든 Zernike 계수를 0.1λ로 가정한 가상의 파면 $P(r, \theta)$ 를 만들고, 이 가상의 파면을 근거로 x와 y축으로 층밀리움을 갖는 두 파면 기울기를 만들었다. 이때 두 파면 기울기 사이의 각도는 정확히 직교하는 90°가 아닌 오차 1°를 포함 시킨 뒤 Modal 방법¹⁸⁾을 적용해서 파면을 복원했

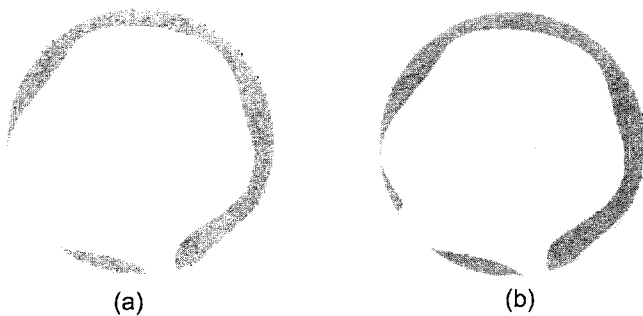


그림 5. 랜덤 오차 하에서의 자가 보정법의 적용 결과. (a) Residual error after previous calibration (PV: 0.0038 μm, RMS: 0.00057λ), (b) Residual error after suggested calibration (PV: 0.0022 μm, RMS: 0.00034λ).



그림 6. 층밀리기 간섭계에서 두 파면 기울기의 직교 정도에 기인한 오차. (a) Systematic error by two non-orthogonal wavefront slopes in the shearing interferometer (PV: 0.019 μm, (b) Residual error after suggested calibration (PV: 0.0016 μm, RMS: $5 \times 10^{-7}\lambda$).

다. 그림 6의 (a)는 복원된 파면과 처음 만든 파면의 차를 그린 것으로 두 파면 기울기의 직교정도에 기인한 오차를 의미한다. 그림 6(b)는 3절에서 제안된 직교오차 보정을 수행한 결과를 보여준다. 복원된 측정파면에서 직교오차를 보정함으로써 측정오차가 1/10로 감소됨을 알 수 있다.

실제 측정을 통한 자가보정의 효과를 검증하기 위해 그림 7과 같이 수직형 층밀리기 간섭계가 구성되었다. 측정 시편은 DVD 픽업렌즈이며, 이를 광축을 중심으로 회전 시키기 위한 스테이지 부분이 추가되었다. 그림 8은 구성된 2축 층밀리기 간섭계와 DVD 픽업렌즈의 사진을 보여 준다. 위상천이는 PC에서 앰프를 통해 PZT를 구동해서 수행하며, 다이오드 레이저를 발진해서 광원으로 사용하였다.

그림 9(a)는 위의 층밀리기 간섭계에서 복원한 파면이고, 9(b)는 본 논문의 보정법을 적용한 파면이다. 픽업에 사용되는 레이저 다이오드는 타원형 광을 발진하므로 큰 비점수차(astigmatism)를 시스템오차로 갖고 있다. 그림 9(a)와 (b)를 통해 말 안장(saddle) 모양의 비점수차가 줄어든 것을 확인 할

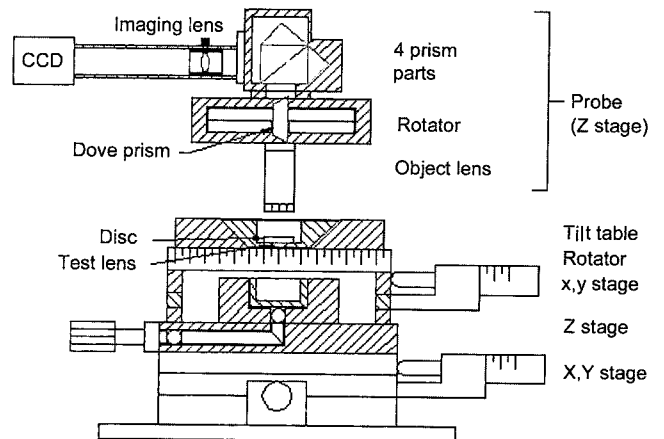


그림 7. 픽업렌즈 성능평가를 위한 2축 층밀리기 간섭계 시스템 구성도.

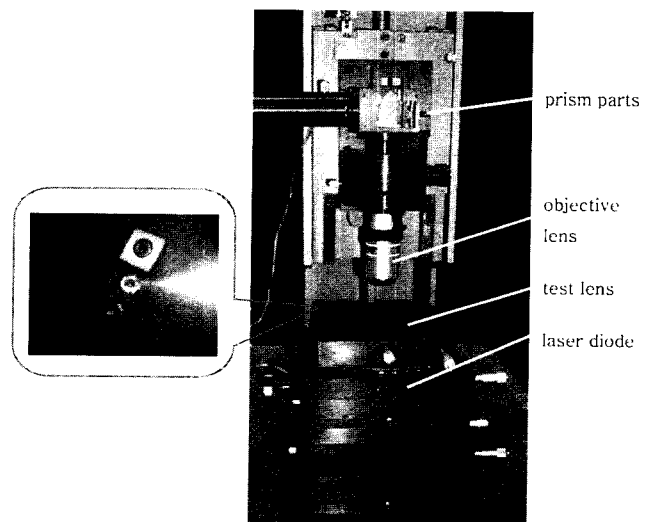


그림 8. 층밀리기 간섭계 사진 및 DVD 픽업 렌즈.

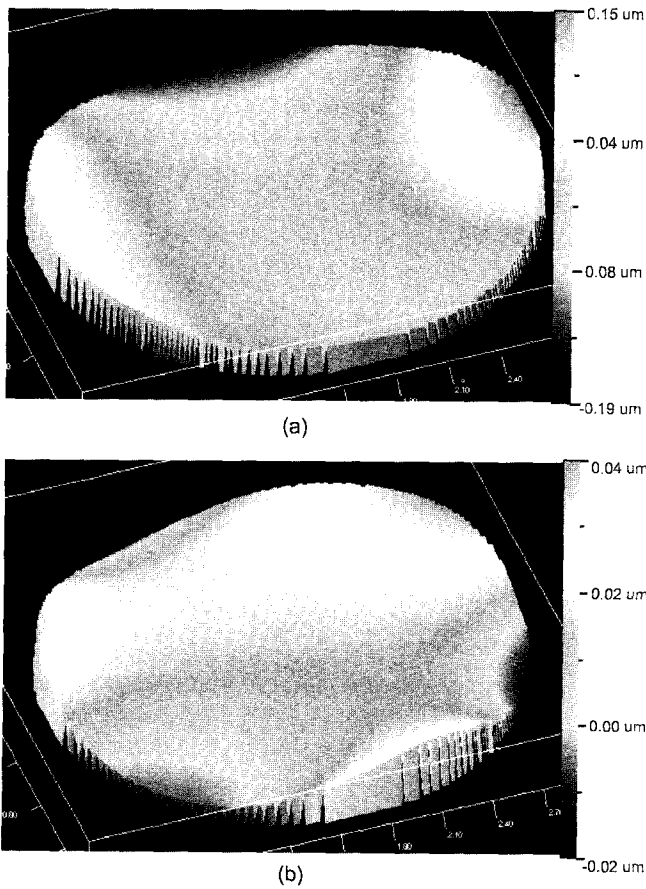


그림 9. DVD 픽업 렌즈의 측정 및 보정 파면. (a) Reconstructed wavefront of the DVD pick-up lens. (b) Calibrated wavefront of the dvd pick-up lens.

수 있다.

그림 10의 (a)는 증밀리기 간섭계에 대해 자가보정법을 적용해서 15회 측정된 결과다. 픽업렌즈에서 중요한 수차 RMS의 반복을 표시한 결과, 15회 측정의 평균은 보정 전 0.075λ, 보정법 적용 후 0.033λ가 얻어졌다. 그리고 직교오차까지 보정한 후 0.028λ가 얻어졌다. 그림 10(b)는 Zygo의 Fizeau 간섭계로 동일한 DVD렌즈를 측정한 수차 RMS와 본 논문의 증밀리기 간섭계로 측정하고 보정한 결과를 비교한 그림으로, 양쪽이 비슷한 정도의 반복성을 얻을 수 있었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 증밀리기 간섭계의 계통오차의 보정 방법을 제안하였다. 증밀리기 간섭계는 피조우 간섭계 등에 비해 비구면 측정이 용이하고 비용이 저렴하지만, 계통오차가 비교적 크다는 단점을 갖고 있다. 본 논문에서는 증밀리기 간섭계의 계통오차를 광학계에 의한 오차와 파면 기울기의 직교 정도에서 오는 오차로 구분하고 각각을 보정할 수 있는 방법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 보정 방법이 안정적이고 우수함을 검증할 수 있었다. 실제로 CD, DVD 픽업 렌즈의 수차 측정을 위한 2축 증밀리기 간섭계를 구성했고, 보

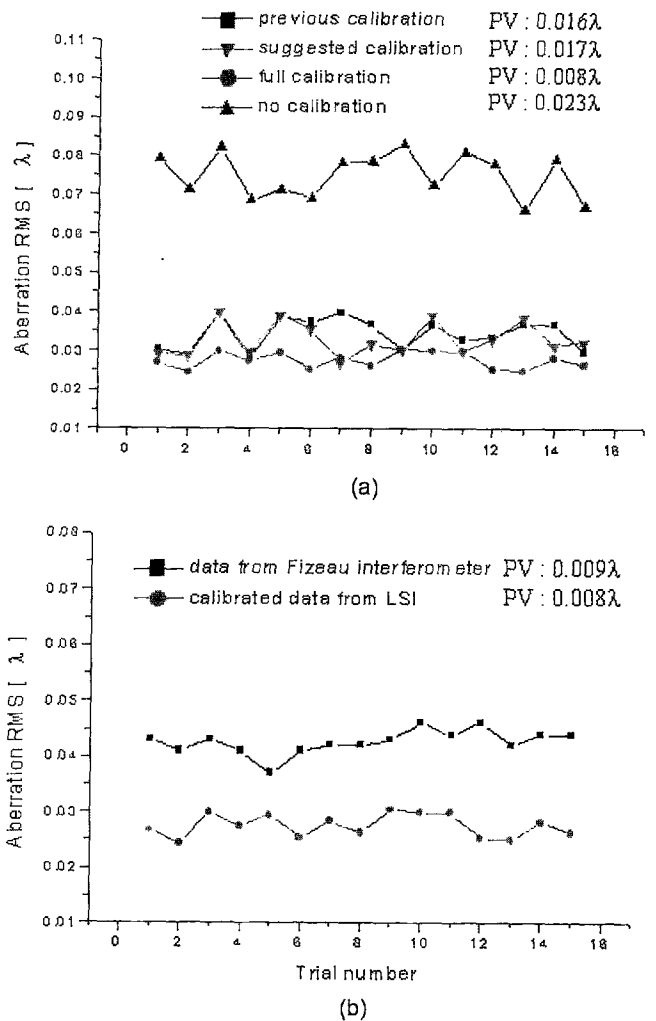


그림 10. DVD 픽업 렌즈 측정을 통한 2축 증밀리기 간섭계의 반복능 검사. (a) Comparison of each calibration method, (b) Comparison of Fizeau data and calibrated LSI data.

정을 적용함으로써 보다 개선된 측정 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- [1] D. Malacara, ed., *Optical Shop Testing 2nd ed.*, (Wiley, New York, 1992), Chap 1, p. 43.
- [2] D. Malacara, ed., *Optical Shop Testing 2nd ed.*, (Wiley, New York, 1992), Chap 4, p. 123.
- [3] S. W. Kim, W. J. Cho, and B. C. Kim, "Lateral-shearing interferometer using square prisms for optical testing of aspheric lenses," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 9, pp. 1129-1137, 1998.
- [4] S. W. Kim, B. C. Kim, and H. G. Rhee, "Lateral-shearing interferometer for optical testing of aspheric optical pick-up lenses," *The Review of Laser Engineering*, vol. 26, pp. 1-5, 1998.
- [5] C. Evans, R. Hocken, and W. Estler, "Self-calibration: reversal, redundancy, error separation, and absolute testing," *Annals of the CIRP*, vol. 45, no. 2, pp. 617-634, 1996.

- [6] C. Evans and R. Kestner, "Test optics error removal," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 7, pp. 1015-1021, 1996.
- [7] M. Servin, D. Malacara, and J. Marroquin, "Wavefront recovery from two orthogonal sheared interferograms," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 22, pp. 4343-4348, 1996.
- [8] R.H. Hudgin, "Wave-front reconstruction for compensated imaging," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 67, no. 3, pp. 375-378, 1977.
- [9] R. Cubalchini, "Modal wave-front estimation from phase derivative measurements," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 69, no. 7, pp. 972-977, 1978.
- [10] J. Herrmann, "Cross coupling and aliasing in modal wave-front estimation," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 71, no. 8, pp. 989-992, 1981.
- [11] G. Harbers, P. J. Kunst, and G.W.R. Leibbrandt, "Analysis of lateral shearing interferograms by use of Zernike polynomials," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 31, pp. 6162-6172, 1996.
- [12] S. W. Kim, H. G. Rhee, and B. C. Kim, "Arbitrary N-step algorithm for removal of higher order test optics errors," *Proc. ASPE Annual Meeting*, vol. 20, pp. 432-435, 1999.

Systematic error calibration of 2-axis lateral shearing interferometer

Hyug-Gyo Rhee and Seung-Woo Kim[†]

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, KOREA

[†]*E-mail: swk@kaist.ac.kr*

(Receive December 21, 2001 ; revised manuscript received February 25, 2002)

We present a new self-calibration method to remove the systematic error of a 2-axis lateral shearing interferometer that has been specially designed for optical testing of aspheric optics. The method takes multiple measurements by rotating the test optics and extracts the systematic error by fitting the measured wavefronts into the Zernike polynomials. The method works with arbitrary azimuthal angles for test optics rotation, which offers an advantage of correcting the error induced by the non-orthogonality of the two axes of wavefront shearing as well as the error caused by the optical components of the interferometer system itself.

Classification codes : SM.030, SM.040.