

광학계 수차에 의한 백색광 간섭계의 측정 오차에 대한 연구

박민철 · 김승우[†]

한국과학기술원 기계공학과

Ⓣ 305-701 대전 유성구 구성동 373-1번지

임노빈

조선대학교 광기술공학과

Ⓣ 501-759 광주광역시 동구 서석2동 375번지

(2001년 4월 24일 받음, 2001년 8월 21일 수정본 받음)

간섭계의 수차는 물체광과 기준광이 서로 상쇄하는 것으로 알려져 있지만, 물체가 기울어진 경우 완벽한 상쇄가 이루어지지 않아 간섭무늬에 영향을 준다. 본 논문에서는 수차 해석을 통해 이 현상이 백색광 주사 간섭무늬의 두 정점 중, 위상 정점에 직접적인 영향을 주어 오차로 작용함을 보인다. 위상 정점은 가시도 정점에 비하여 높은 분해능과 외란에 대해 강인한 반면, 광학계의 수차에 의해 차수 계산의 부정확함이 유발되고, 측정 정밀도가 떨어지는 단점을 갖는다. 두 정점의 차이 값 계산을 실험한 결과, 위상 정점은 100 nm 수준의 오차를 갖고, 특히 그 오차가 광학계의 정렬 오차에 기인함을 보인다.

분류코드 : SM.020.

I. 서 론

백색광주사간섭계는 백색광의 넓은 주파수 영역으로 인한 짧은 가간섭거리를 활용하여 미세표면의 삼차원 형상측정에 널리 응용되고 있다.^[1] 형상측정의 기본원리는 측정표면 또는 기준거울의 위치를 광축 방향으로 정밀 이송하면서, 이때 얻어진 간섭무늬의 정점을 검출함으로써 이루어진다. 백색광 간섭무늬의 정점은 가시도 정점(envelope peak)과 위상 정점(fringe peak)으로 나뉘어 계산된다.^[2] 위상 정점은 매우 높은 분해능을 갖는 반면, 위상 정점의 절대 차수 계산이 가시도 정점을 기준으로 계산되기 때문에, 이의 오차에 크게 의존하는 단점을 갖는다. 더욱이, 위상 정점의 차수 오차는 측정 대상물의 기울어짐에 따라 증가하고, 두 정점의 측정 결과가 서로 달라 두 결과 중 참 값이 어디인지를 확인하기 어려운 문제가 있다. 본 논문에서는 이를 광학계의 수차이론을 이용하여 규명한다.

일반적인 간섭계(two-beam interferometer)에서는 기준 광속과 측정 광속이 같은 광학계를 통과하여 서로 상쇄하는 효과를 갖기 때문에, 수차의 영향이 나타나지 않는다.

예외적으로 단색 광원을 사용하는 광 위상 간섭계(Phase Shifting Interferometer)의 경우에 기준 거울에 대한 측정 대상물의 초점 오차에 의해 5~20 nm의 측정오차를 갖는다.^[7] 백색광 주사 간섭계는 단색의 레이저 광원과 비교하여 가간섭거리가 4~6 μm 범위로 한정되므로, 초점 오차에 의한 수차의 영향은 없다. 이러한 사실로부터, 백색광 주사 간섭계는 광학계의 수차에 완벽히 분리된 상태에서 형상 측정을 수행하는 것으로 알려져 있다.

하지만, 그림 1과 같이 기울어진 거울면을 측정할 경우, 기준 광속과 측정 광속은 서로 다른 광경로를 갖게 되어 두 광속이 서로 상쇄되지 않는 문제가 있다. 기존의 광 위상 간섭계는 대물렌즈의 좁은 초점 심도로 인하여 측정 영역이 매우 작아 기울어진 면 측정 자체가 불가능하므로, 광속이 상쇄되지 않는 문제는 크게 고려되지 않았다. 이와는 반대로, 광학계의 개구수(NA)가 허락하는 집광 각도내에서 어떤 기울어진 물

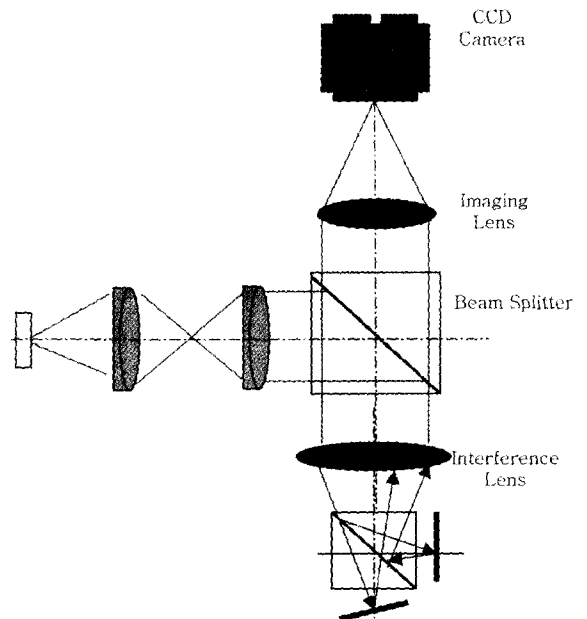


그림 1. 기울어진 거울면에 의한 백색광 주사 간섭계의 광 경로 변화.

[†]E-mail: swk@kaist.ac.kr

체도 측정할 수 있는 백색광 주사 간섭계는 상쇄되지 않는 수차의 영향을 받는다. 본 논문에서는 광학계의 정렬오차가 백색광 간섭무늬의 위상 정점에 직접적인 영향을 주어 측정 오차로 작용함을 보이고, 실험적으로 증명한다. 이와 같이, 광학계의 수차에 따라 두 정점의 차이 값이 다른 분포를 보이는 현상은 복잡한 광학계의 정렬 상태를 진단하는 하나의 방법으로 응용될 수 있다.

II. 백색광 간섭 무늬의 두 정점

백색광주사간섭은 마이켈슨(Michelson), 미라우(Mirau), 리닉(Linnik) 등 여러 형태의 간섭광학계를 통해 구현될 수 있다. 형상측정에서 요구되는 간섭계의 주사이송은 측정물체를 광축의 z-방향으로 구동함으로써 구현한다. 측정물체 상의 특정 점의 높이를 $z_0(x, y)$ 라 하면, 주사거리 z에 대한 간섭무늬의 광강도 변화는 다음과 같이 표현된다.^[2]

$$I(x, y, z) = I_0[1 + g(x, y, z)\cos\{2k_c(z - z_m(x, y)) + \phi_m\}] \quad (1)$$

여기서 $g(x, y, z)$ 는 간섭무늬의 가시도함수(coherence envelope function)를 의미한다. 또한, 위식에서 I_0 는 배경광의 강도, k_c 는 조명광의 중심 파장 λ_c 에 의해 결정되는 파수(wavenumber, $k_c = 2\pi/\lambda_c$)이다. ϕ_m 은 측정 대상물이 금속인 경우 발생하는 위상 변화 값이다. 식 (1)에서 물체의 위치 z_0 가 z_m 으로 다르게 표기된 것은, 백색광 조명에 의해 간섭무늬의 정점 z_m 이 z_0 로부터 이동하기 때문으로, 두 위치는 $z_m = z_0 - 0.5d\phi/dk$ 의 관계를 갖는다.^[8] 식 (1)을 기반으로 재생한 백색광 간섭무늬는 그림 2와 같고, XY측정영역 전체에 발생한 간섭무늬의 정점

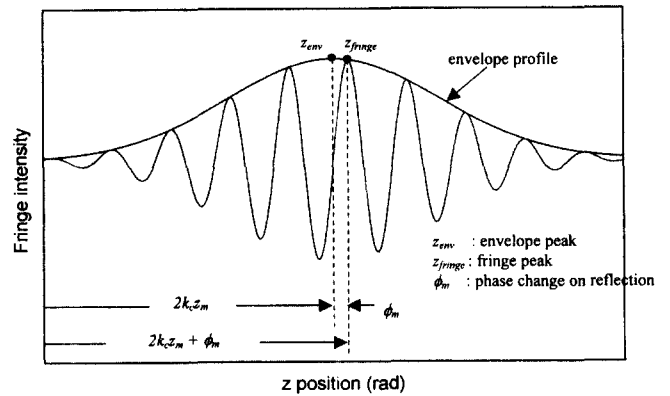


그림 2. 백색광 간섭 무늬의 가시도 정점과 위상 정점.

을 각각 검출함으로써 측정대상물의 3차원 형상을 복원할 수 있다.

백색광 간섭무늬의 정점은 그림 2와 같이 가시도 함수의 최고점인 가시도 정점(envelope peak)과 간섭무늬가 최대값을 갖는 위상 정점(fringe peak)으로 나뉜다.^[2-6] 가시도 정점은 가시도 함수 $g(x, y, z)$ 의 최고점으로 $z_{env} = z_m$ 로 표현되고, 위상 정점은 이로부터 위상 변화 ϕ_m 의 값만큼 이동한 것으로 $z_{fringe} = z_m - \phi_m/2k_c$ 로 표현된다. 위상 정점은 광 위상 간섭법(Phase Shifting Interferometry)의 위상 측정법과 같은 방식으로, 가시도 정점을 기준으로 한 식 (2)의 계산식으로 산출된다.^[6]

$$z_{fringe} = \frac{1}{2k_c} \left[\phi_m + 2\pi \cdot \text{Int} \left(\frac{2k_c z_{env} - \phi_m}{2\pi} \right) \right] \quad (2)$$

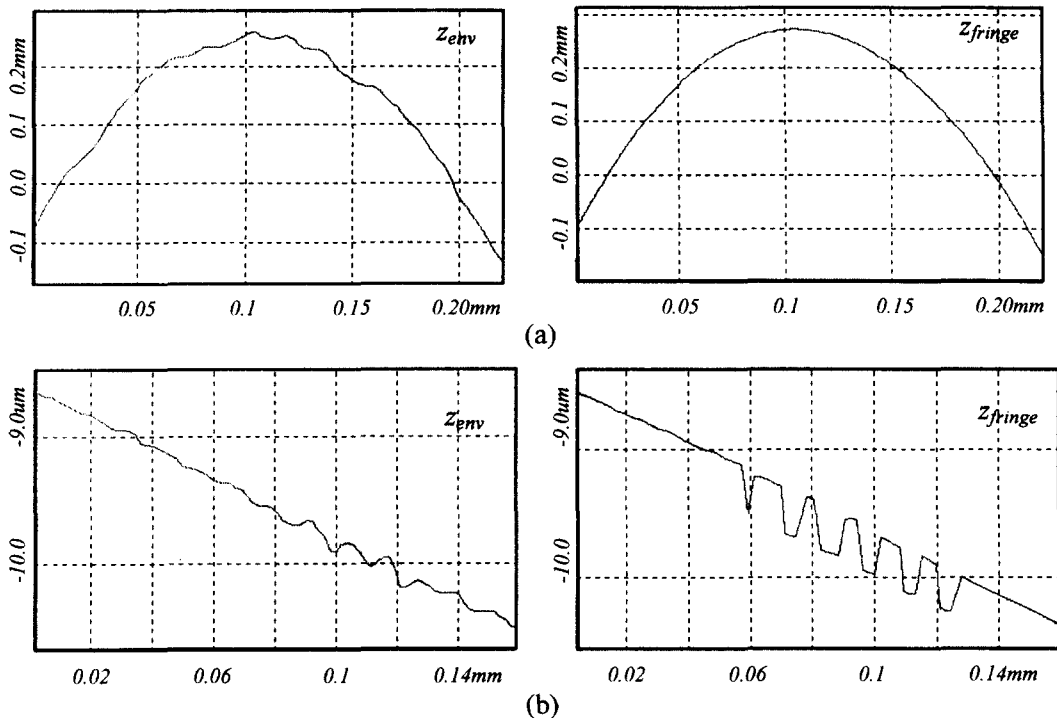


그림 3. 가시도 정점과 위상 정점을 이용한 측정 결과 (a) 두 정점을 이용한 측정 결과 (b) 위상 정점의 차수 계산에 오차가 발생한 경우.

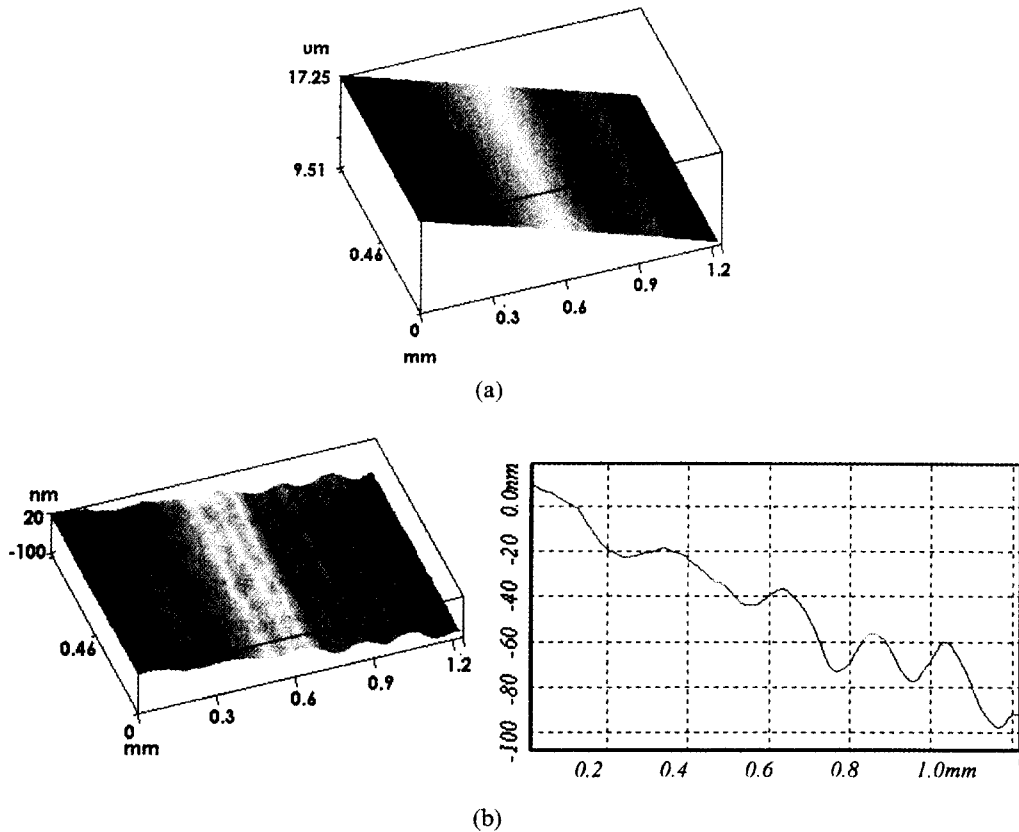


그림 4. 0.4° 기울어진 거울면의 측정 결과 (a) 가시도 정점과 위상 정점의 측정 결과 (b) 두 정점의 차이 값($z_{env} - z_{fringe}$) 계산 결과.

식 (2)의 $Int()$ 함수는 인자에 가장 가까운 정수를 출력하는 연산자로서, 위상 ϕ_m 이 위치한 절대 차수(Absolute Order)를 계산한다. 위상 정점은 가시도 정점에 비하여 우수한 분해능을 갖고, 외부 교란에 강인한 것으로 알려져 있지만,^[2] 가시도 정점의 작은 오차가 절대 차수 계산에 영향을 미치는 단점을 갖는다. 이는 식 (2)에서 가시도 정점 $z_{env}(=z_m)$ 의 작은 오차가 차수 계산에 영향을 주어 $\pm 2\pi$ 의 매우 큰 오차로 증폭시킴으로 확인할 수 있다. 그림 3(a)는 단차 시편의 측정 결과를 두 정점으로 나누어 계산한 결과로서, 위상 정점의 계산 결과가 더 우수한 정밀도를 보임을 확인할 수 있다. 하지만, 그림 3(b)에서 기울어진 거울면을 측정할 경우, 차수 계산의 이상으로 $2\pi(=\lambda_c/2)$ 의 오차가 발생한다.

절대 차수의 계산은 Sandoz,^[9] Harasaki^[10]등에 의해 개선된 알고리즘이 제안되었고, 이들은 두 정점의 차이 값 $z_{em}(x, y) - z_{fringe}(x, y)$ 이 XY측정 전 영역에 대하여 일정하다는 가정 하에 전개된다. 그림 4(a)는 $NA = 0.13$ 의 5배 마이켈슨 간섭 대물렌즈를 이용하고, 0.4° 기울어진 거울면을 측정할 결과이다. 가시도 정점과 위상 정점 모두 같은 측정 결과값을 갖는 것으로 보이지만, 두 계산 결과의 차이는 약 ± 50 nm의 기울기 오차가 발생함을 그림 4(b)에서 확인할 수 있다. 이는 XY영역 전체에 대하여 두 정점의 차이 값이 일정하다는 가정에 위배되는 현상으로, 위상 정점의 차수 계산에 심각한 오차를 야기시키는 요소가 된다. 식 (3)은 차이 값이 (x, y) 각 위치에 대하여 다르게 표현됨을 보인다.

$$z_{env}(x, y) - z_{fringe}(x, y) = d(x, y) \tag{3}$$

이 현상은 측정 대상물이 기울어진 경우 두드러지는데, 본 논문에서는 이를 광학계의 수차이론을 이용하여 규명하고, 실험을 통하여 광학계의 정렬 오차가 미치는 영향을 확인한다.

III. 백색광 주사 간섭계의 수차

백색광 주사 간섭계로 기울어진 거울면을 측정할 경우, 물체광(Object Beam)과 기준광(Reference Beam)이 서로 다른 광경로를 갖고, 이에 의해 광학계의 수차가 상쇄되지 않음은 그림 1을 통하여 설명하였다. 본 장에서는 광학계의 수차가 백색광 간섭무늬에 주는 영향에 대해 설명한다.

서로 상쇄하지 않는 두 광선에 의한 수차의 설명은 유한 광추적법(Finite Ray Tracing)과 같은 매우 복잡한 계산을 필요로 하기 때문에, 이를 간단히 하기 위해서 다음과 같이 렌즈의 특성을 설명하고, 간단한 가정을 도입한다. 그림 5에서와 같이 평행한 면에서 반사된 Ray1과 기울어진 면의 반사광 Ray2는 서로 다른 경로를 갖지만 렌즈의 기본 성질에 의해 두 광의 광로정, [Ray1]과 [Ray2]는 같고, 최종 영상면에서 만나 서로 간섭함을 알 수 있다. 단, 두 광은 다른 광 경로를 겪었기 때문에 두 광이 갖는 수차의 양은 서로 다르다. 한편, Creath^[11]는 물체가 각도 α 만큼 기울어진 경우, 대물렌즈의 개구수(NA) 값은 원래의 $\sin\theta_0$ 에서 $NA_{eff} = \sin(\theta_0 - \alpha)$ 로 바뀔

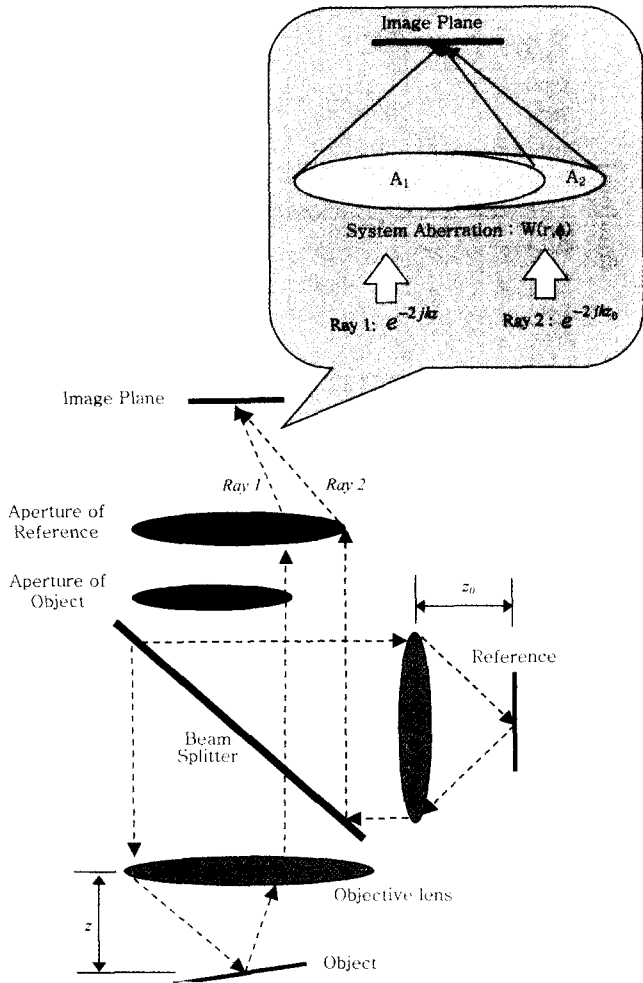


그림 5. 물체의 기울어짐에 따른 창(Aperture) 크기 변화.

설명하였는데, 유효 개구수(Effective NA) NA_{eff} 는 기울어진 물체에 의해 반사된 광의 동(Aperture) 크기가 줄어들을 말한다. 이 사실로부터 기준광과 물체광이 형성하는 동 크기는 그림 5와 같이 다르게 형성되어 두 광이 겹치는 영역과 기준광만 통과하는 영역으로 나뉜다. 겹치는 영역을 통과하는 두 광이 서로 상쇄된다고 가정하면, 다음과 같은 해석적 전개가 가능하다.

그림 5에서 기준거울까지의 거리를 z_0 , 물체의 거리를 z 라 하면, 기준광과 물체광은 e^{-2jkz_0} , $e^{j(2kz+\phi)}$ 로 각각 표현된다. ϕ 는 측정 대상물이 금속인 경우 발생하는 위상 변화 값이다. 광학계의 출사동에서 물체광 $e^{j(2kz+\phi)}$ 가 통과하는 영역을 A_1 으로 정의하면, 기준광이 통과하는 영역은 A_1+A_2 로 표현된다. 영역 A_2 는 기준광이 물체광과 중복되지 않는 영역으로, 두 광이 영상면에서 이루는 간섭은 식 (4)로 표현된다. 식 (4)에서 $W(r, \phi)$ 는 출사 동에서 표현된 광학계 전체의 수차 함수이다.

$$E = \int_{A_1+A_2} e^{-j\{2k(z_0+W(r,\phi))\}} dA + \int_{A_2} e^{-j\{2k(z+W(r,\phi))+\phi\}} dA \quad (4)$$

식 (4)의 적분식을 간단히 하기 위하여 다음과 같이 변수 치환하였다.

$$\begin{aligned} \bar{A}_1 e^{-2jk\bar{W}_1} &= \int_{A_1} e^{-2jkW(r,\phi)} dA \\ \bar{A}_2 e^{-2jk\bar{W}_2} &= \int_{A_2} e^{-2jkW(r,\phi)} dA \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에 의해 간단히 표현되는 간섭식을 이용한 최종 광 강도의 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I &= \left| A_1 \{ e^{-j\{2k(z_0+W_1)\}} + e^{-j\{2k(z+W_1)+\phi\}} \} + A_2 e^{-j\{k(z+W_2)\}} \right|^2 \\ &= 2A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos 2k(W_1 - W_2) \\ &\quad + 2A_1^2 \cos \{ 2k(z - z_0) + \phi \} \\ &\quad + 2A_1A_2 \cos \{ 2k(z - z_0) + 2k(W_1 - W_2) + \phi \} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 \bar{A} , \bar{W} 는 간단한 표현을 위해 A, W 로 바꾸어 표현하였다. 식 (6)의 세번째 항인 $2A_1A_2 \cos 2k(W_1 - W_2)$ 은 거리 z 에 무관한 항으로서, $2A_1^2 + A_2^2$ 과 마찬가지로 상수항이 되어 무시된다. 결국, 간섭은 나머지 항인 $2A_1^2 \cos \{ 2k(z - z_0) + \phi \} + 2A_1A_2 \cos \{ 2k(z - z_0) + 2k(W_1 - W_2) + \phi \}$ 로 표현되는데, 이 중 첫째 항은 물체광과 기준광의 중복된 영역 A_1 에 의한 간섭항으로, 수차는 상쇄되어 나타나지 않는다. 반면, 두번째 항은 두 영역 A_1, A_2 에 의한 수차값 $W_2 - W_1$ 이 위상에 포함되는데, 이에 의해 간섭무늬는 수차의 영향을 받게 된다. 만일, 측정 대상물이 기울어 지지 않아 물체광과 기준광이 완전히 중복된 경우, $A_2=0, W_2=0$ 이 되어, 식 (6)의 광 강도 표현식은 $I=2A_1^2 + 2A_1^2 \cos \{ 2k(z - z_0) + \phi \}$ 가 되어, 기존의 광 위상 간섭계와 같은 형태를 갖는다. 백색광 간섭무늬 재생을 위하여, 식 (6)에서 계산된 광강도를 백색광 광원의 파장대역 전체에서 적분하는 식은 다음과 같다.

$$I(z - z_0) = \int_{\lambda_c - \Delta\lambda}^{\lambda_c + \Delta\lambda} I_\lambda(z - z_0) F(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

식 (7)에서 $F(\lambda)$ 는 광원의 스펙트럼으로 일반적으로 가우시안 함수로 표현한다. λ_c 는 백색광 광원의 중심 파장, $2\Delta\lambda$ 는 파장 대역을 나타낸다. 식 (7)의 적분 결과는 다음과 같이 표현된다.

$$I = I_0 \{ 1 + g_1 \cos \{ 2k_c(z - z_m) + \phi_m \} + g_2 \cos \{ 2k_c(z - z_m) + \phi_m \} \} \quad (8)$$

가시도 함수 g_1, g_2 로 나누어지는 두 간섭식은 식 (6)의 두 간섭항이 백색광원에 대하여 적분된 결과이다. 따라서, 식 (8)에서 k_c, z_m, ϕ_m 은 식 (1)에서와 같이 광원의 중심 파장, 가시도 함수의 정점, 금속 물질에 의한 위상 변화를 나타낸다. 두번째 간섭항의 위상 ϕ_m 은 광학계의 수차에 의해 변조된 값으로, 식 (6)에서 $2k(W_1 - W_2) + \phi$ 가 백색광원으로 적분 되어 산출된 값이다.

결국, 측정 대상물이 기울어진 경우, 광학계의 수차는 백색광 간섭무늬의 위상 값에 변화를 야기시키고, 이는 위상 정점

3. Calculating $I(z)$ by changing image coordinate σ

2. Calculating $E(z)$ considering aberration W

1. Calculating aperture size by surface tilt α

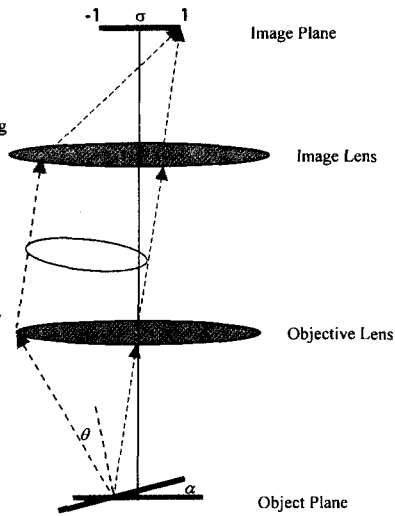


그림 6. 모의실험의 순서.

에 오차 값으로 포함된다. 또한, 수차는 결상면 XY영역에서 각기 다른 분포를 갖기 때문에, 위상 ϕ_m 역시 XY 영역에서 서로 다른 값을 갖게 된다. 이러한 사실은 그림 4와 식 (3)에서 두 정점의 차이 값이 XY 전체 영역에서 균일하지 않은 이유를 설명한다. 측정 대상물이 기울어진 경우, 광학계의 수차는 XY 전체 영역에서 다른 분포를 갖아 위상 정점의 차수 계산에 오차를 야기시키고, 아울러 위상 정점 자체를 이동시키는 오차 요인이 된다.

IV. 수차 이론의 모의실험

이상의 해석적 전개로부터 수차에 의한 백색광 주사 간섭계의 오차를 직접 유도하는 일은 매우 복잡한데, 이의 용이함을 위해 다음과 같은 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험은 그림 6에 도시한 바와 같이 다음과 같은 순서로 진행되었다.

a) 각도 α 로 기울어진 물체에 의해 변화된 창(Aperture)크기 계산

b) 수차 함수 $W(r, \phi)$ 를 고려한 식 (8)의 광강도 계산

c) 결상 면의 영역 전체에 대한 백색광 간섭무늬 생성

첫번째 단계 a)에서 각도 α 로 기울어진 측정 대상물에 의해 변화된 창크기 A_1 은 광선추적법(Ray Tracing)을 이용하여 계산된다. 크기 A_1 은 간섭대물렌즈에 의해 형성된 입사동(Entrance Pupil)을 통과하는 모든 조명광속이 기울어진 거울면에 의해 반사되어 다시 입사동을 통과하는지를 확인하여 결정한다. 광선추적에 고려한 변수는 거울면의 각도 α 와 간섭대물렌즈의 개구수값(NA)으로, 개구수값은 최대 집속 각도 θ_0 를 결정하고, 각도 α 에 의해 최종 창크기가 계산된다.

단계 b)에서는 이상에서 획득한 창크기 A_1 과 A_2 를 고려하여 식 (5)의 적분계수를 계산하고, 다음으로 식 (7), (8)을 이용하여 최종 광강도 $I(z)$ 를 계산한다. 식 (5)의 적분에 사용되는 수차함 $W(r, \phi)$ 는 다음과 같은 자이델 수차식을 사용하였다.^[12]

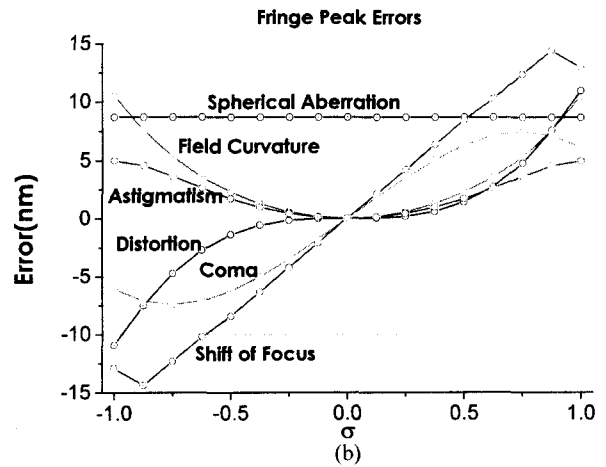
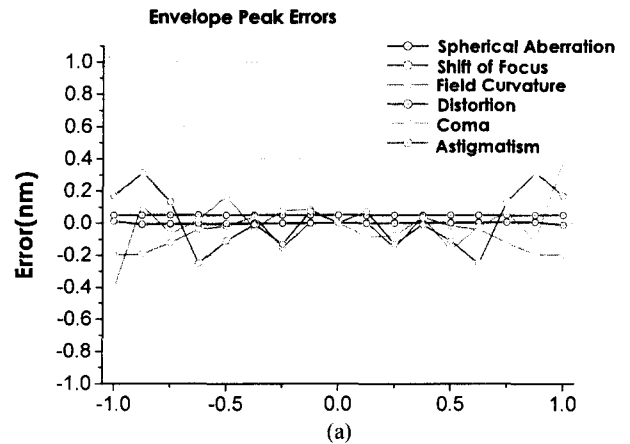


그림 7. 수차에 의한 측정값의 변화($W=0.6\lambda$, Tilt = 2°) (a) 가시도 정점(Envelope Peak)의 오차 (a) 위상 정점(Fringe Peak)의 오차.

$$W(r, \phi) = {}_0c_{20}r^2 + {}_1c_{11}\sigma r \cos\phi + {}_0c_{40}r^4 + {}_1c_{31}\sigma r^3 \cos\phi + {}_2c_{22}\sigma^2 r^2 \cos^2\phi + {}_2c_{20}\sigma^2 r^2 + {}_3c_{11}\sigma^3 r \cos\phi \quad (9)$$

식 (9)에서 수차 W 는 출사동에서의 극좌표 (r, ϕ) 로 표현되었다. 좌표 r 은 $0 < r < 1$ 로 정규화 되었고, 각도 ϕ 는 $0 < \phi < 2\pi$ 의 값을 갖는다. 각 항의 계수 c 는 수차항의 크기를 나타내는 것으로 종방향 초점 오차(Focusing Error), 횡방향 초점 오차(Lateral Shift of Focus), 구면수차(Spherical Aberration), 코마수차(Coma), 비점수차(Astigmatism), 상면만곡(Field Curvature), 왜곡수차(Distortion)의 순서로 표현되었다. 이들은 최저차 수차들로서, 광학계의 결상 능력을 좌우하는 가장 기본적인 수차들이다. 계수 σ 는 그림 7에서와 같이 결상면의 좌표가 $-1 < \sigma < 1$ 의 값으로 정규화 된 값이다.

단계 c)는 광강도 $I(z)$ 의 계산을 결상면 영역 전체에서 구현하는 것으로, 결상면 좌표 σ 를 -1에서 1의 값으로 변화시키며 단계 a), b)의 계산을 반복하였다.

이상의 과정으로 백색광 간섭무늬를 생성하였고, 식 (7)의 적분에 사용한 파장 구간은 $\Delta\lambda = 100 \text{ nm}$, $\lambda_c = 580 \text{ nm}$ 로 하였다. 생성한 백색광 간섭무늬로부터 2장에서 설명한 가시도 정점과 위상 정점을 검출할 수 있고, 검출 방법은 Park^[6]의 QPFA를

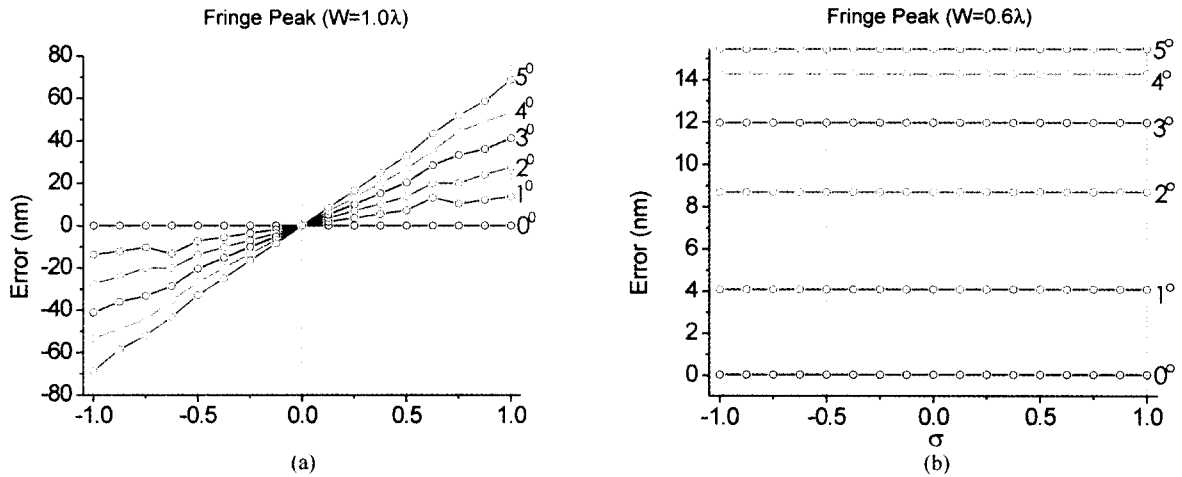


그림 8. 측정물의 기울기 변화에 따른 위상 정점(Fringe Peak)의 변화 (a) 횡방향 초점 위치 수차의 영향($W = {}_1c_{11}\sigma\cos\phi$) (b) 구면 수차 ($W = {}_0c_{40}r^4$)에 의한 오차.

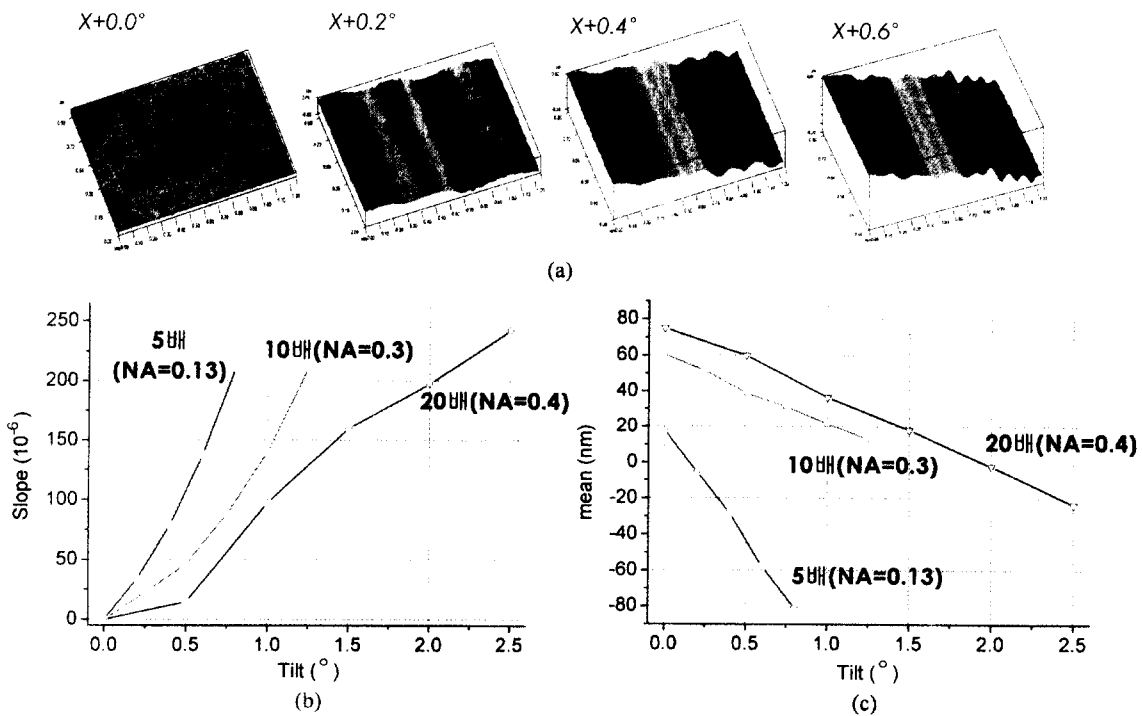


그림 9. 측정물의 기울기 변화에 따른 차이 값 변화 (a) 물체의 기울기 변화에 따른 차이값($z_{em}(x,y) - z_{fringe}(x,y)$) (b) 기울기값의 변화 ($\angle(z_{em}(x,y) - z_{fringe}(x,y))$) (c) 평균값의 변화($\mu(z_{em}(x,y) - z_{fringe}(x,y))$).

이용하였다. 모의 실험은 물체의 기울기 α 와 각 수차항의 계수 c_{nm} 의 크기를 변화시키면서 진행되었고, $\alpha = 2^\circ$, $c_{nm} = 0.6 \lambda$ 인 경우 검출한 가시도 정점과 위상 정점은 그림 7과 같다. 그림 7(a)는 가시도 정점 검출 결과로서, 그 오차가 모든 수차에 대하여 $\pm 0.4 \text{ nm}$ 를 넘지 않는다. 반면, 그림 6(b)의 위상 정점은 각 수차마다 일정한 오차의 형상을 갖고, 그 크기 역시 최대 $\pm 15 \text{ nm}$ 로 매우 크다. 구면수차는 영상면에 대해서 8.5 nm 의 균일 오차를 갖고, 상면만곡과 비점수차는 대칭의 형태로 각각 $0 \sim 11.5 \text{ nm}$, $0 \sim 5 \text{ nm}$ 의 오차분포를 보인다.

한편 초점오차, 코마, 왜곡수차는 비대칭의 형태로 $\pm 15 \text{ nm}$, $\pm 11 \text{ nm}$, $\pm 7 \text{ nm}$ 의 오차를 갖는다.

그림 8은 수차의 크기 c_{nm} 을 일정하게 하고, 기울기 α 를 변화시키면서 관찰한 위상 정점의 변화이다. 그림 8(a)는 횡방향 초점 오차만을 고려한 경우로서, 크기는 ${}_1c_{11} = 1.0 \lambda$ 로 하였다. 기울기 α 의 크기에 비례하여 오차가 증가하고, $\alpha = 5^\circ$ 인 경우, $\pm 70 \text{ nm}$ 의 매우 큰 오차가 나타난다. 그림 8(b)는 구면 수차항만을 고려한 경우로서, 기울기가 커질수록 영상 전 영역에 일정한 분포로 증가함을 확인할 수 있다.

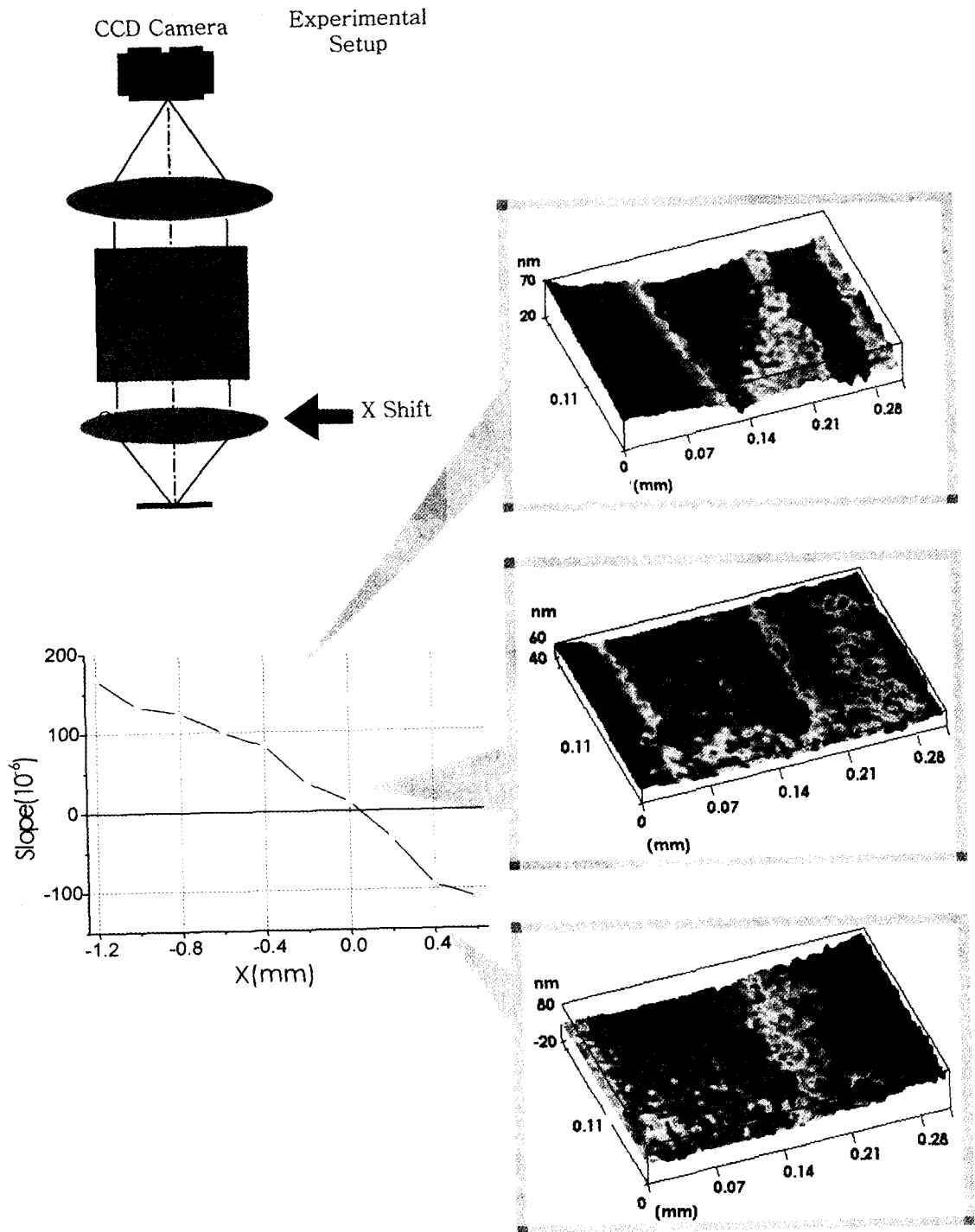


그림 10. 정렬 오차에 의한 위상 정점의 변화 실험.

그림 8(a)의 모의실험 결과와, 그림 4의 두 정점 차이 값 결과를 비교해보면, 일정한 기울기 형태로 같음을 확인할 수 있다. 이로부터, 간섭 광학계에 횡방향 초점 오차항이 가장 큰 수차 항임을 유추할 수 있다. Hopkins,^[13] Rimmer^[14]는 광학계의 정렬 오차가 횡방향 초점 오차(Lateral Shift of Focus)와 코마 수차(Coma)로 두드러지게 확대됨을 증명하였는데, 결국, 두 정점의 차이 값이 그림 4와 같이 일정한 기울기로 분포하는 것은

광학계의 정렬오차에 의해 위상 정점이 이동했기 때문이다.

V. 실험 결과

이상에서 해석한 백색광 주사 간섭계의 수차를 검증하기 위하여 측정 대상물의 기울기를 가하기 위한 구동 분해능 0.002°, 최대 기울기 10°의 틸트(tilt) 테이블을 추가하였다. 그

림 9는 평면 거울을 일정 각도로 기울이며 측정한 결과들로서, 먼저 그림 9(a)는 거울면을 0.2°씩 기울이며 5배 간섭대물렌즈로 측정한 결과이다. 모의 실험에서 확인한 바와 같이 기울기의 증가에 따라 두 정점의 차이 값은 일정한 기울기로 증가한다. 그림 9(b)는 간섭대물렌즈의 배율 5, 10, 20배로 변화시키며 반복한 실험 결과이다. 모든 간섭 대물 렌즈의 측정 결과는 기울기 변화에 따라 차이 값의 기울기도 비례하여 증가한다. 이 결과에서 배율이 작을수록 차이 값의 기울기도 커짐을 확인할 수 있는데, 이는 저 배율 렌즈일수록 창 크기 (Aperture)가 커져 수차의 영향에 더욱 민감해지기 때문이다. 그림 9(c)는 배율별로 차이 값의 평균($\mu(z_{em}(x,y) - z_{fringe}(x,y))$)을 계산한 것으로, 역시 측정 대상물의 기울기에 따라 값이 변화한다. 이것은 모의 실험 결과와 비교해 보면, 광학계의 구면 수차때문으로 해석된다. 특히, 미라우(Mirau) 타입인 10배, 20배 대물렌즈보다 마이켈슨 타입인 5배 대물렌즈에서 두드러지는 것은, 마이켈슨 간섭대물렌즈 내부의 직경 10 mm의 사각형 광 분할기 (beam splitter) 의 수차가 크게 작용하기 때문이다.

차이 값 오차가 물체의 기울기에 비례하여 선형적으로 증가하는 것은 모의 실험 결과와 비교해 보면 횡 방향 초점오차 (Lateral Shift of Focus)의 원인이 가장 두드러지기 때문이다. 횡 방향 초점오차의 원인은 주로 광학계 정렬오차^{13,14)}에 의한 것인데, 정렬오차의 영향은 그림 10과 같이 고의로 간섭대물렌즈를 이동시킴으로 확인할 수 있다. 전체 광학계를 고정시키고, 장착한 20배 간섭대물렌즈를 X 방향으로 이동시키면서 1° 기울어진 거울면을 측정하였다. 이동 거리에 따라 두 정점의 차이 값 분포는 그림 10과 같이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 차이 값이 완전 평면이 된 점을 X=0이라 하면 이 점을 기준으로 +, - 방향에 따라 기울기의 부호가 바뀌고, X=0.4 mm의 이동에 90×10⁻⁶의 기울기 변화가 있다. 차이 값이 완전 평면이 된 지점은 광학계의 정렬 수차와 간섭대물렌즈의 수차가 서로 상쇄된 지점으로 해석할 수 있다. 이상의 실험 결과로부터 백색광 간섭무늬의 위상정점은 광학계 수차의 영향을 직접적으로 받고 있음을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

간섭계의 수차는 물체광과 기준광이 서로 상쇄하는 것으로 알려져 있지만, 물체가 기울어진 경우 완벽한 상쇄가 이루어지지 않아 간섭무늬에 영향을 준다. 본 논문에서는 먼저, 광학계의 수차가 백색광 간섭 무늬의 가시도 정점과 위상 정점에 미치는 영향을 해석적으로 증명하였다. 가시도 정점은 수차에 무관한 반면, 위상 정점은 수차의 직접적인 영향을 받아 오차를 갖는다. 결국, 위상 정점은 가시도 정점에 비하여 높은 분해능과 외란에 대해 강인한 반면, 광학계의 수차에 의해 차수 계산의 부정확함이 유발되고, 측정 정밀도가 떨어지는 단점을

갖는다. 물체의 기울기와 측정 배율을 변화시키며 실험한 결과, 위상 정점은 10~100 nm의 오차를 갖고, 그 주요 원인이 광학계의 정렬오차에 기인함을 보였다. 이 결과를 역으로 이용하면, 백색광 주사 간섭계는 광학계의 수차를 직접 진단하는 새로운 방법으로 응용될 수 있다.

참고문헌

- [1] G. Kino and S. Chim, "The Mirau correlation microscope," *Applied Optics*, vol. 29, no. 26, pp. 3775-3783, 1990.
- [2] K. Creath, "Sampling requirements for white light interferometry," *Proc. Fringe '97, Academic Verlag*, pp. 52-59, 1997.
- [3] P. Groot and L. Deck, "Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms," *Opt. Lett.*, vol. 18, pp. 1462-1464, 1993.
- [4] P. D. Groot and L. Deck, "Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency," *Journal of Modern Optics*, vol. 42, no. 2, pp. 389-401, 1995.
- [5] K. Larkin, "Efficient nonlinear algorithm for envelop detection in white light interferometry," *J. of Optical Society of America A*, vol. 13, no. 4, pp. 832-843, 1996.
- [6] M. C. Park and S. W. Kim, "Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white light scanning interferograms," *Opt. Eng.*, vol. 39, pp. 952-957, 2000.
- [7] T. Doi, T. Vorburger, and P. Sullivan, "Effects of defocus and algorithm on optical step height calibration," *Precision Engineering*, vol. 23, pp. 135-143, 1999.
- [8] M. C. Park and S. W. Kim, "Calibration of phase change upon reflection in white light interferometry for step height measurement," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 7, pp. 420-422, 2001.
- [9] P. Sandoz, R. Devillers, and A. Plata, "Unambiguous profilometry by fringe-order identification in white-light phase-shifting interferometry," *J. of Modern Optics*, vol. 44, no. 3, pp. 519-534, 1997.
- [10] A. Harasaki, J. Schmit, and J. C. Wyant, "Improved vertical-scanning interferometry," *Applied Optics*, vol. 39, no. 13, pp. 2107-2115, 2000.
- [11] K. Creath, "Calibration of numerical aperture effects in interferometric microscope objectives," *Applied Optics*, vol. 28, no. 15, pp. 3333-3338, 1989.
- [12] W. R. Welford, *Aberrations of Optical Systems* (Adam Hilger Ltd., 1986), pp. 78-161.
- [13] H. H. Hopkins and H. J. Tiziani, "A theoretical and experimental study of lens centering errors and their influence on optical image quality," *British Journal of Applied Physics*, vol. 17, pp. 33-54, 1966.
- [14] M. Rimmer, "Analysis of perturbed lens systems," *Applied Optics*, vol. 9, no. 3, pp. 533-537, 1970.

Aberration effects on white light interferometry

Min-Cheol Park and Seung-Woo Kim[†]

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

[†]*E-mail: swk@kaist.ac.kr*

Noh Bin Yim

Dept. of Photonic Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, KOREA

(Received April 24, 2001 ; revised manuscript received August 21, 2001)

We prove that 3-D profile mapping using white light interferometry has systematic errors caused by aberrations of the optical system. The tilt of an object invokes an offset between the object and the reference ray, which eventually makes the aberration cancel incompletely. The fringe peak of a white light interferogram is mainly affected by the aberration effect while the envelope peak remains stable. By the difference between the two peaks, it is easily confirmed how much the error existed in the fringe peak. Experimental results prove that the error caused by aberration is varied by object tilt, microscope NA, optics alignment within the range of ± 50 nm.

Classification code : SM.020.