

위상측정 간섭계를 이용한 수십 Å급 및 sub Å급 반사경 기판 조도 평가

조민식 · 정태호 · 오문수

국방과학연구소 제I기술연구본부

(1999년 5월 11일 받음, 1999년 6월 30일 수정본 받음)

위상측정 간섭계(phase-measuring interferometer)를 이용한 표면조도(surface roughness) RMS값 수십 Å급과 sub Å급 반사경 기판의 조도 평가 특성이 조사되었다. 위상측정 간섭계의 조도 측정오차에 대한 위상 및 강도 데이터 평균의 영향이 조사되었으며, 이를 근거로 조도 측정오차를 최소화하는 최적의 위상 평균횟수와 강도 평균횟수가 도출되었다. 수십 Å급 샘플의 경우, 조도 측정값은 데이터 평균의 영향을 적게 받은 반면, sub Å급 반사경 기판의 경우는 위상 및 강도 평균횟수가 증가할수록 표면조도 측정오차가 뚜렷이 감소하였다. sub Å급 반사경 기판 조도 측정시에 위상 평균 30회, 강도 평균 20회에서 안정적이고, 신호 대 잡음비가 최대인 조도 측정값을 얻을 수 있었다. 이때의 조도 측정값은 광학적 heterodyne 간섭계에 의한 조도 측정결과와도 잘 일치하였다. 최적 데이터 평균횟수에서 표면조도 측정 반복도 역시 0.01Å이하의 양호한 측정오차를 보였다.

I. 서 론

고분해능 분광학, 레이저 주파수 안정화, 단원자 레이저, 레이저 자이로 등의 다양한 분야에서 널리 응용되는 저손실, 고반사율 반사경 제작은 고품질의 반사경 기판 사용을 전제로 하고 있다. 1Å이하의 표면조도를 요구하는 반사경 기판의 초연마 기술과 저손실 반사경 박막코팅 기술은 최근 수 년 사이에 상당한 발전이 이루어졌으며, 이와 함께 초연마 반사경 기판의 표면조도 측정기술이 중요한 분야로 주목받고 있다. 표면조도 측정기법은 현재까지 여러 가지 방법이 연구, 발전되어 왔는데, 접촉식 측정방법으로 stylus 방법^[1]과 비접촉식 측정방법으로 광학 간섭계 방법,^[2,5] 스캔닝 전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscopes)^[6] 등이 있다. 이들 중 광학 간섭계 방법은 표면형상을 직접 측정 가능하다는 점에서 유망한 비접촉 표면측정 기법으로 알려져 있다.

광학식 비접촉 측정기법의 일종인 이중광선 위상측정 간섭계(two beam phase-shifting interferometer)는 일반 간섭계에서와 마찬가지로 진동에 대해 민감한 단점을 가지고 있다. 조도측정 과정에 기해진 외부 진동은 위상측정 간섭계의 위상변화를 유발시켜서 표면조도 측정값에 오차를 초래할 수 있다.^[7] 위상측정 간섭계의 위상 ramp신호 조준(calibration)오차,^[8] 비선형 ramp 운동^[9] 감지기 잡음 및 비선형성,^[10] 불필요한 반사에 의한 데이터 오류,^[11] 낮은 간섭무늬 대비 등도 위상측정 간섭계의 측정 정확도를 저하시키는 요인들로 꼽을 수 있다. 이들 오차요인은 표면조도가 작은 샘플로 갈수록 조도 측정값에 상당한 영향을 미치게 된다. 이런 관점에서, 표면조도의 측정오차 요인을 수학적으로 모델링하고 컴퓨터의 데이터처리 단계에서 관련 오차의 영향을 제거시키고자 하는 알고리즘 개발에 많은 연구가 진행되고 있으며,^[2, 12, 13] 이들 중의 하나가 데이터 평균방법이다.^[14] 데이터 평균방법은 데이터 획득 시스템의 신호 대 잡음비를 증대시켜서 장비의 측정 반복도를 향

상시키는 기법이다. 위상측정 간섭계를 이용한 표면조도 평가는에는 위상 평균과 강도 평균을 활용할 수 있다. 이와 같은 데이터 평균의 효과는 샘플의 종류나 간섭계의 주변환경에 따라서 다를 수 있다. 따라서 위상측정 간섭계를 이용하여 미세한 샘플표면의 형상을 평가하고자 할 때, 위상측정 간섭계의 조도평가 특성을 체계적으로 파악하고, 이를 토대로 측정 오차를 최소화할 수 있는 간섭계 운영 방안을 확립함으로서 정확한 표면조도 측정수치를 얻어내는 것은 매우 중요한 일이다.

본 논문에서는 위상측정 간섭계의 반사경 기판 표면조도 평가 특성이 조사되었다. 수십 Å급 및 sub Å급 반사경 기판 표면조도를 평가할 때 위상측정 간섭계 데이터 처리조건에 따른 표면조도 측정값 변화를 조사하여 간섭계의 조도 측정오차 특성을 파악하고자 하였다. 수십 Å급 샘플의 측정은 반사경 기판으로서의 의미보다는, sub Å급 반사경 기판의 경우와 비교하여 샘플 표면조도 크기에 대한 위상측정 간섭계의 조도측정 특성을 조사하려는 의도에서 수행되었다. 다음으로, sub Å급 반사경 기판의 표면조도 측정시 측정오차를 최소화하는 최적 위상 및 강도 평균횟수가 도출되었다. 또한 설정된 최적 데이터 평균횟수에서 반사경 기판의 표면조도 측정 반복도가 조사되었다.

II. 위상측정 간섭계의 표면조도 평가

2.1. 위상측정 간섭계 광학 시스템

표면조도 측정실험에 사용한 위상측정 간섭계 시스템의 개략도가 그림 1에 나타나 있다. 실험에 사용된 간섭계는 미국 Zygo사의 모델명 Maxim GP Surface Profiler로서, 간섭계 구성에 대해 공개된 사항이 없으나, 일반적인 위상측정 간섭계와 비교하여 큰 차이점은 없을 것으로 예측된다. 여기서는 위상측정 간섭계의 동작 및 측정원리를 이해하는 관점에서 위상측정 간섭계의 구성에 대해 간단히 알아보기로 한다.^[15]

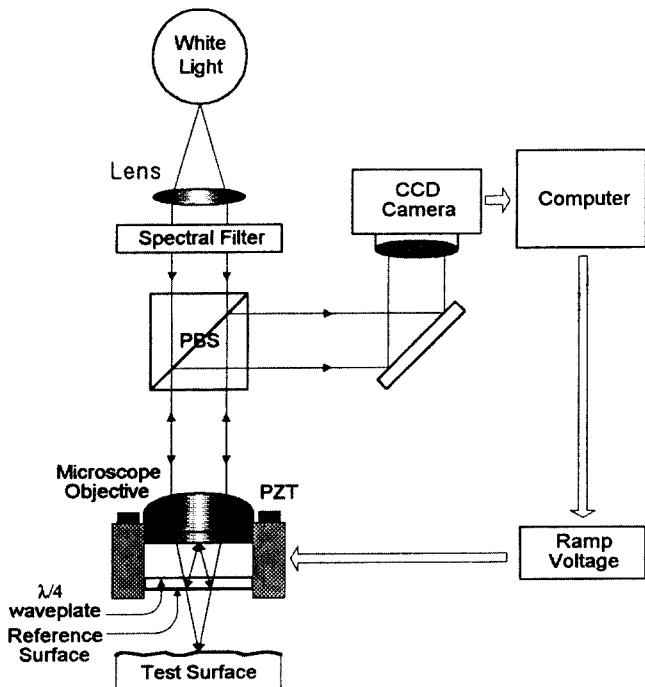


그림 1. 위상측정 간섭계 시스템 구성도.

그림 1의 간섭계 광원은 백색 준점광원(quasi-point light source)을 필터링한 단색광이 사용되며 공간적으로 가간섭성이 없어야(spatially incoherent) 한다. 간섭계 광원의 공간적 가간섭성 감소는 시스템 부품에서 회절되어 나타나는 간섭무늬의 존재범위를 축소시킴으로서 전반적인 광선의 파면 질을 개선시키는 효과가 있다. 입사광선은 시스템의 광선 강도 준위를 조정하는 가변성 neutral-density 필터를 통과한다. 준점광원(quasi-point source)으로부터 나온 광선은 편광분리기를 통해 s-편광의 광선만을 활용하게 된다. 편광분리기를 통과한 s-편광 광선은 현미경 대물렌즈 배열에 의해 기준표면과 샘플 표면에 입사된다. 기준표면은 1/4 파장판으로 이루어져 있다. 1/4 파장판의 뒷면이 기준표면의 역할을 하게 되며, 부분반사 코팅처리가 되어 입사광의 일부가 샘플표면에 입사하게 된다. 기준표면과 샘플표면에서 반사되어 돌아오는 광선은 1/4 파장판을 2회 통과함으로서 p-편광으로 편광상태가 90도 회전한 후, 편광분리기를 통과하면서 입사광원과 다른 방향으로 분리된다. 1/4 파장판 앞단에서 반사된 모든 광선은 입사광선과 동일한 편광상태를 유지하기 때문에 간섭계의 CCD 감지기 방향으로 들어가지 못한다. 기준면과 샘플표면에서 반사된 광선은 기준표면에서 만나게 되어 간섭무늬를 형성한 후 편광분리기를 통과하여 CCD 카메라에 도달한다. CCD 카메라에서는 두 광선이 만들어낸 간섭광의 강도분포를 감지하여 샘플 표면의 상을 컴퓨터 모니터 상에 나타내어 준다.

2.2. 위상측정 간섭계의 표면조도 측정 원리

위상측정 간섭계는 샘플 표면의 형상에 따라 변화하는 위상을 읽어 표면의 높이를 결정해준다. 이때 정적 무늬 분석으로부터 얻을 수 있는 것보다 더욱 정확한 표면 높이 정보를 얻

기 위해서 두 간섭하는 파면의 위상관계를 자동적으로 정량화하는 동적 위상측정 기술이 사용된다. 빠르고 정확한 동적 위상측정 기법의 핵심은 간섭계의 위상변조로서, 위상측정 간섭계에 장착된 piezoelectric transducer(PZT)에 의해 수행된다. 데이터 처리 알고리즘은 이를바 integrated bucket technique이 이용되고 있다.^[2, 15]

위상측정 간섭계의 기준표면에서 만난 기준표면 반사광과 샘플표면 반사광의 간섭무늬 강도는 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$I = I_1 + I_2 \cos \{ \phi(x,y) + \alpha(t) \} \quad (1-1)$$

여기서 첫 번째 항은 샘플표면 반사광과 기준표면 반사광 강도의 합이고, 두 번째 항은 두 반사광선의 간섭합이다.

두 번째 항 팔호 안의 $\phi(x,y)$ 는 CCD 배열판 각 픽셀(pixel) 위치에서의 초기 위상이고, $\alpha(t)$ 는 간섭 파면사이의 시간에 따른 위상 변화량을 나타낸다. 위상 변화 $\alpha(t)$ 는 앞의 그림 1에 나타나 있는 바와 같이 현미경 대물렌즈와 1/4 파장판 결합체에 장착된 PZT에 의해 이루어진다. 컴퓨터로 제어되는 ramp 전압이 PZT에 가해지면 현미경 대물렌즈와 1/4 파장판은 일정한 속도로 샘플 표면을 향해 이동하게 되고, 샘플 표면과 기준표면의 광경로가 감소함에 따라 간섭무늬의 변조가 일어난다. CCD 배열판은 PZT에 가해지는 1회 ramp 신호구간 안에서 등간격의 5개 간섭무늬 강도 데이터를 읽도록 되어 있다. Ramp 신호 하나 안에서 샘플과 기준표면 사이의 위상은 450도 만큼 변화한다. 즉, 5개의 강도 데이터 중 연속되는 각각의 두 데이터 사이에는 90도의 위상차이가 개입된다. 이것이 integrated five-bucket technique이다. 위상 변화 $\alpha(t)$ 가 0에서 $\pi/2$ 로, $\pi/2$ 에서 π 로, π 에서 $3\pi/2$ 로, $3\pi/2$ 에서 2π 로, 2π 에서 $5\pi/2$ 로 변화하는 동안, 각 픽셀 위치에서 간섭무늬 강도는 적분이 이루어진다. 이때 각 pixel에서의 간섭무늬 강도는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} A(x,y) &= I_1 + I_2 \{ \cos[\phi(x,y)] - \sin[\phi(x,y)] \} \\ B(x,y) &= I_1 - I_2 \{ \cos[\phi(x,y)] + \sin[\phi(x,y)] \} \\ C(x,y) &= I_1 - I_2 \{ \cos[\phi(x,y)] - \sin[\phi(x,y)] \} \\ D(x,y) &= I_1 + I_2 \{ \cos[\phi(x,y)] + \sin[\phi(x,y)] \} \\ E(x,y) &= I_1 + I_2 \{ \cos[\phi(x,y)] - \sin[\phi(x,y)] \} \end{aligned} \quad (1-2)$$

CCD 배열판 각 픽셀에서의 초기 위상값 $\phi(x,y)$ 는 위 (1-2)식 A, B, C, D, 그리고 E 간섭무늬 강도 측정값으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\phi(x,y) = \tan^{-1} \frac{A(x,y) + E(x,y) - 2C(x,y)}{2(B(x,y) - D(x,y))} + \pi/4 \quad (1-3)$$

위상측정 알고리즘을 수행하는 동안 수식 (1-3)안의 랜섬과 나이트섬은 CCD 배열판에서의 고정된 간섭무늬 noise 성분과 detector부분의 이득변화 영향을 상쇄시켜 주는 효과가 있다. 즉, (1-2)식으로 표현되는 강도 데이터 자체가 가지는 fixed noise는 수식 (1-3)을 통해 제거하고, 측정 데이터에 포함된 random noise는 간섭무늬 위상 및 강도 데이터를 여러 번 측정하여 평균을 취함으로써 제거할 수 있다.

각 픽셀 위치에서의 초기 위상 $\phi(x,y)$ 가 CCD 배열판 전 영역에 거쳐서 계산되면 각 위치에 대응하는 샘플 표면의 높이 분포는 아래의 관계식에 의해 결정지어 진다.

$$\begin{aligned} \phi(x,y) &= k \cdot 2h(x,y), \quad k = 2\pi / \lambda \\ \therefore h(x,y) &= (\lambda / 4\pi) \cdot \phi(x,y) \end{aligned} \quad (1-4)$$

여기서 λ 는 간섭계에 사용되는 광원의 파장이다.

CCD 배열판의 신호는 아날로그-디지털 변환기를 거쳐 디지털 신호로 출력된 후 컴퓨터에 저장된다. 컴퓨터에 저장된 디지털 강도 데이터는 위에서 기술한 방식으로 샘플 표면과 기준 표면사이의 상대적인 높이 차이를 계산하여 샘플의 표면조도를 제시해 준다.

III. 위상이동 간섭계를 이용한 반사경 기판 조도평가 특성실험 및 분석

3.1. 샘플의 표면조도 크기에 따른 조도 측정값과 간섭계 데이터 처리조건 관계 조사

위상측정 간섭계의 데이터 처리조건과 이에 따른 간섭계의 반사경 기판 표면조도 평가 특성이 조사되었다. 간섭계의 데이터는 샘플표면의 위상 및 강도 데이터를 여러 차례 측정한 후 그 평균값을 적용함으로서, 데이터 평균에 대한 표면조도 측정값 변화를 조사하였다. 측정값의 오차는 반복측정을 통한 조도측정값의 표준편차 크기로 평가하였다. 조도측정 실험은 표면조도 RMS 값이 수 Å급인 샘플과 1Å이하인 초연마 기판을 대상으로 하였다. 실험에 사용된 위상측정 간섭계는 진동 격리된 광학 테이블 위에 장치되었으며, 측정이 이루어지는 동안 온도와 습도를 일정하게 유지시키기 위하여 항온항습기를 가동시켰다.

첫 번째 실험은 표면조도 RMS값이 수십 Å급인 샘플을 대상으로 이루어졌다. 우선, 강도 평균횟수를 1회로 고정시키고, 위상 평균횟수를 1회, 5회, 10회, 20회, 30회로 각각 변화시켜 가면서 조도측정을 수행하였다. 각 측정그룹에서는 6회 이상의 반복측정이 이루어졌으며, 이로부터 표면조도 측정값의 평균과 표준편차가 얻어졌다. 그림 2는 위상 및 강도 평균횟수 변화에 따른 샘플의 조도 측정결과를 보여준다. 샘플의 표면조도 P-V (Peak to Valley)값과 RMS값은 위상 평균횟수가 1회인 경우, 각각 729.44Å, 21.06Å로 측정되었으며, 위상 평균횟수가 30회인 경우에는 738.92Å, 20.44Å로 측정되었다. 위상 평균횟수 증가에 따른 표면조도 P-V와 RMS 측정값의 표준편차에서는 감소나 증가의 뚜렷한 변화경향이 관측되지 않았다. 즉, 표면조도 RMS값과 P-V값의 평균이나 표준편차는 강도평균 1회(측정그룹 1)의 조건에서 크게 나타났으나, 위상 평균 5회(측정그룹 2) 이상에서는 약간 개선된 후 거의 일정한 조도 측정값을 유지하였다.

두 번째 조도 측정실험은 표면조도 RMS값이 sub Å급인 초연마 반사경 기판을 대상으로 하여 이루어졌다. 첫 번째 실험에서와 마찬가지로 간섭계 데이터 처리시 강도 평균횟수를 1회로 고정시키고, 위상 평균횟수를 변화시켜 가면서 5가지 측정그룹에 대한 샘플의 표면조도 P-V값과 RMS값을 조사하였

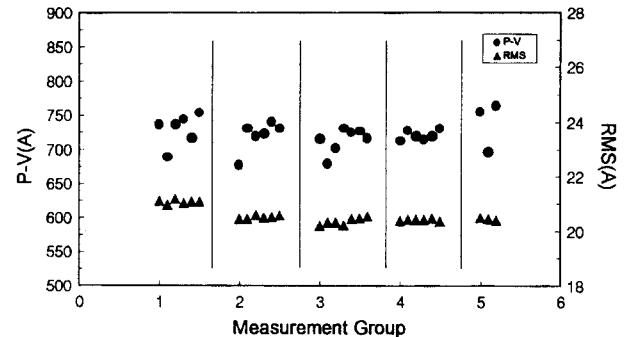


그림 2. 표면조도 수십 Å급 샘플에서의 조도 측정값과 위상 및 강도 평균횟수관계. 측정그룹1: 위상/강도 평균횟수=1/1, 그룹2: 5/1, 그룹3: 10/1, 그룹4: 20/1, 그룹5: 30/1.

다. 샘플의 표면조도 RMS값과 P-V값 측정결과가 그림 3에 나타나 있다. 위상 평균횟수가 1회인 경우, 샘플의 표면조도 P-V값과 RMS값은 각각 47.71Å, 5.22Å로 측정되었으며, 위상 평균횟수가 증가함에 따라 점차 감소하여 위상 평균횟수가 30회인 경우에는 20.92Å, 1.21Å로 측정되었다. 위상 평균횟수의 증가에 따른 표면조도 P-V와 RMS 측정값의 표준편차도 위상 평균횟수가 1회에서 각각 3.594Å, 0.042Å, 위상 평균횟수 20회에서 1.028Å, 0.002Å으로 감소하였다. 즉, 표면조도 sub Å급 초연마된 샘플의 경우는 선택된 위상 및 강도 평균 횟수 증가에 따라, 표면조도 측정값과 측정값의 표준편차가 급격히 감소한 후 점차 그 감소 폭이 둔화되고, 결국은 포화상태로 접근하는 현상을 보였다.

위의 두 가지 샘플에 대한 위상측정 간섭계의 조도 측정결과는, 서로 다른 표면조도 샘플에서의 조도 측정값과 위상 및 강도 평균횟수 영향을 잘 보여주고 있다. 표면조도 수십 Å급 샘플의 경우 조도 측정값은 데이터 평균횟수의 영향이 미미하게 관측되었다. 표면조도가 큰 샘플에서는 측정신호 대 잡음비율이 상당히 큰 값을 가지고 있기 때문에 데이터 평균횟수에 의한 측정오차 개선효과가 적은 것으로 판단된다. 반면, 표면조도가 작은 샘플의 경우 간섭계가 인지하는 측정신호 대 잡음의 비율은 적은 값을 갖게 된다. 이는 위상 및 강도 데이터 평균을 통하여 측정오차 영향을 감소시켜서, 보다 정확하고 반

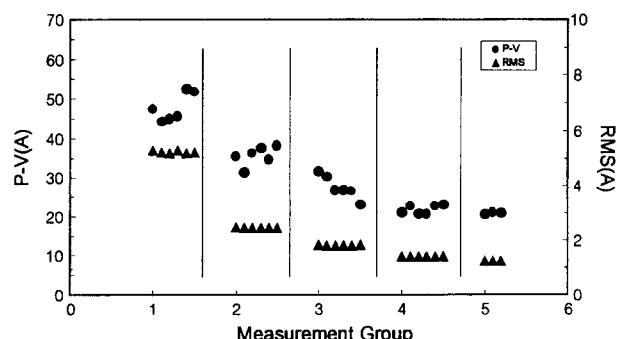


그림 3. 표면조도 sub Å급 샘플에서의 조도 측정값과 위상 및 강도 평균횟수관계. 측정그룹1: 위상/강도 평균횟수=1/1, 그룹2: 5/1, 그룹3: 10/1, 그룹4: 20/1, 그룹5: 30/1.

복성이 향상된 측정값을 얻을 가능성이 높음을 나타낸다. 표면조도 sub Å급 샘플의 조도 측정값은 데이터 평균횟수를 증가시킴에 따라 조도측정값의 표준편차가 뚜렷히 감소하는 경향을 보였으며, 동시에 조도 절대값도 감소 측정되었다. 표면조도 측정 표준편차의 감소는 측정값의 신뢰도를 나타내주는 지표로서 위상 평균횟수 증가에 따라 위상측정 간섭계의 표면조도 측정오차가 개선되고 있음을 보여준다. 따라서, 위상측정 간섭계를 이용한 초연마 반사경 기판의 정확한 조도측정을 위해서는 조도측정값의 표준편차가 최소화되는 데이터 평균횟수를 찾아내는 작업이 우선적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

한편, 위의 두 가지 샘플에 대해 위상 평균을 1회로 고정시키고, 강도 평균횟수를 변화시켜며 표면조도를 측정하는 실험이 수행하였으며, 강도 평균횟수 증가에 따라 위의 실험결과와 마찬가지로 측정오차가 감소함을 볼 수 있었다.

3.2. Sub Å급 반사경 기판 조도 정밀측정을 위한 데이터 평균 최적조건 조사

앞장에서 언급되었듯이, 초연마 반사경 기판의 정확한 조도측정을 위해서는 측정신호 대 잡음의 비율을 최대로 하는 최적 위상 및 강도 평균횟수 설정이 선행되어야 한다. 위상측정 간섭계 Maxim GP를 이용한 샘플의 조도측정에서 최적 위상 및 강도 평균횟수를 찾기 위하여 위상 평균을 1회, 20회, 30회, 40회로 변화시키면서, 각 경우에 측정되는 샘플의 조도값을 조사하였다. 정해진 위상 평균횟수 안에서는 다시 강도 평균을 1회, 10회, 20회, 30회로 변화시켜 측정조도에 미치는 위상과 강도의 평균횟수 영향을 동시에 조사하였다.

위상 평균횟수 네 가지 경우에 대한 초연마 반사경 기판의 표면조도 측정결과가 그림 4에서 그림 7까지에 나타나 있다. 위상 평균횟수가 10회일 때, 조도 측정값은 강도 평균횟수 1회에서 P-V값 13.89Å, RMS값 1.59Å이었으며, 강도 평균횟수가 증가함에 따라 급격히 감소한 후 강도 평균횟수 10을 기점으로 점차 포화되는 경향을 보였다. 강도 평균횟수 30에서는 P-V값이 5.56Å, RMS값이 0.41Å으로 측정되었다. 한편, 강도 평균횟수가 1회일 때, 위상 평균횟수에 따른 조도 측정값의 변화도 유사한 경향을 보였다. 위상 평균횟수 1회에서 P-V값 13.89Å, RMS값 1.59Å인 측정치가 위상 평균횟수 40

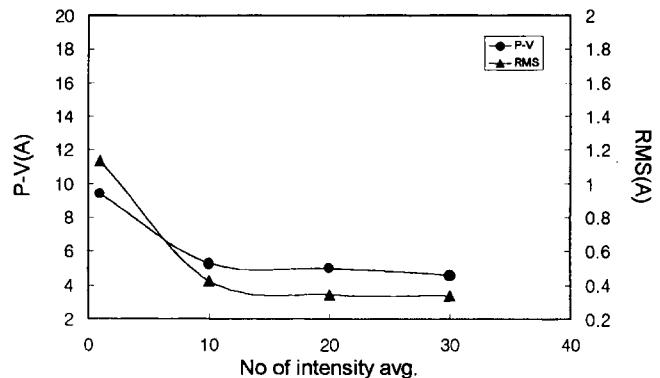


그림 5. 위상 평균횟수 = 20일 때, 강도 평균횟수 변화에 따른 조도 P-V값과 RMS값.

회에서 P-V값 7.09Å, RMS값 0.81Å로 감소 측정되었다.

그림 4에서 그림 7까지의 조도측정 실험결과를 종합적으로 분석할 때, 네가지 모든 위상 평균횟수의 경우에 있어서 강도 평균횟수가 1일 때 가장 큰 조도 P-V값 및 RMS값이 측정되었으며, 강도 평균횟수가 10일 때 측정 조도값이 급격히 감소하면서 점차 측정값의 포화 조짐을 보이기 시작하였다. 강도 평균횟수 20, 30일 때는 이미 포화되어 비슷한 조도 측정값을 나타내었다. 이와 같은 최적 위상 및 강도 평균횟수 도출 실험은 서로 다른 샘플을 대상으로 모두 3회에 걸쳐 수행되었다. 데이터 평균횟수 증가에 따른 조도 측정값의 감소현상은 초연마 샘플을 이용하여 수행된 3회의 모든 실험에서 마찬가지로 관측되었다. 한가지 주목할 사항은, 그림 6과 그림 7의 경우 위상 평균횟수가 증가함에 따라 감소하던 조도 측정값이 위상 평균횟수가 40일 때는 이미 포화되어 30일 때와 비슷한 수치를 제시하였지만, 나머지 1회의 실험에서는 오히려 30일 때보다 증가하기도 했다는 점이다. 이는 데이터 평균횟수가 증가함에 따라 측정 소요시간이 길어지기 때문에 측정시 주변환경의 먼지 유입 등으로 인한 샘플의 표면상태 악화나 간섭무늬의 이동, 또는 진동이 측정위상의 오차 원인들이 개입된 결과로 판단된다. 즉, 측정잡음의 영향을 감소시키기 위해 수행되는 위상 및 강도 데이터 평균의 기능이 측정 소요시간 연장으로 인해 오히려 측정오류를 포함시키는 악영향을 미치고 있는

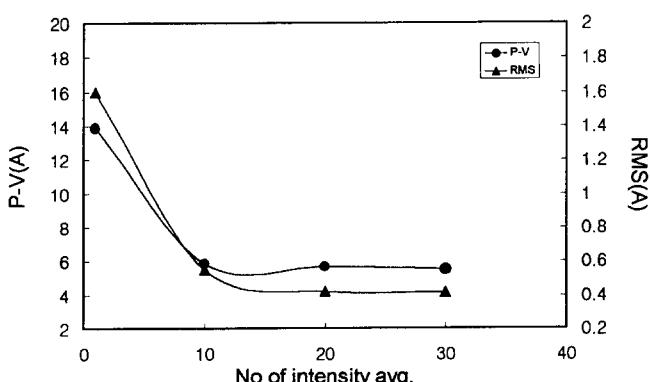


그림 4. 위상 평균횟수=10일 때, 강도 평균횟수 변화에 따른 조도 P-V값과 RMS값.

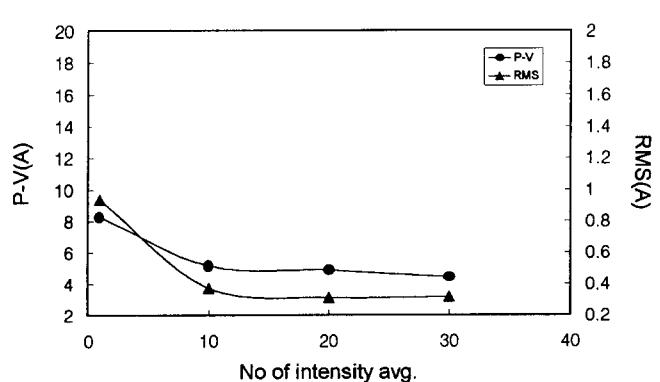


그림 6. 위상 평균횟수 = 30일 때, 강도 평균횟수 변화에 따른 조도 P-V값과 RMS값.

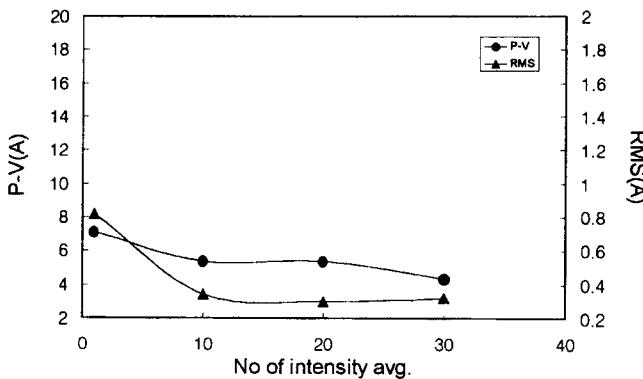


그림 7. 위상 평균횟수 = 40회 때, 강도 평균횟수 변화에 따른 조도 P-V값과 RMS값.

것이다.

따라서, 조도측정값이 포화영역에 충분히 들어오고 외부변화에 대해 안정적인 수치를 제시하는 최적의 위상측정 간섭계 데이터 처리조건으로 위상 평균횟수 30회, 강도 평균횟수 20회의 조건을 설정할 수 있었다. 최적의 측정조건으로 설정된 위상 평균횟수 30회, 강도 평균횟수 20회에서의 조도측정은 약 7분이 소요되었다. 이 조건에서 샘플의 조도 측정값은 P-V값이 약 4.88Å, RMS값이 0.31Å으로서, 광학적 heterodyne 간섭계로 평가한 샘플 판매업체(General Optics사, 미국)의 표면조도 성적서 수치(P-V값 2.25Å, RMS값 0.33Å)와도 잘 일치하였다. 여기서 P-V값이 샘플 판매업체 성적서보다 크게 측정된 이유는 앞에서도 언급하였듯이 세척공정이 미흡한 결과로 판단된다.

3.3. 최적 데이터 평균에서의 sub Å급 반사경 기판 조도측정 반복도 조사

앞장의 실험에서 확인된 최적 데이터 평균에서의 초연마 반사경 기판 조도측정값의 신뢰성을 검증하기 위하여 샘플의 조도측정 반복도 실험을 수행하였다. 동일한 반사경 기판의 표면조도를 반복 측정하였을 때, 측정치간의 편차가 적을수록 그 측정값은 높은 신뢰도를 부여받을 수 있다. 측정 샘플은 앞의 실험에서 사용한 것과는 다른 종류의 초연마 반사경 기판이 사용되었다. 조도 반복측정사이의 시간간격은 3분 이내로서 거의 연속적으로 이루어졌다. 최적의 위상 평균횟수로 30회를 설정하고 강도 평균횟수의 변화에 대한 조도측정 반복도를 조사하였다. 강도 평균횟수는 5회, 10회, 20회, 30회로 변화시켰으며, 각각 6회 반복 측정하여 조도 측정값의 표준편차를 구하였다.

그림 8은 위상 평균횟수 30회에서, 강도 데이터 평균횟수 변화에 따른 표면조도 반복도 실험 결과이다. 강도 평균횟수가 5회일 때, 조도 P-V값 평균과 표준편차는 각각 6.64Å, 0.72Å, 조도 RMS값 평균과 표준편차는 각각 0.48Å, 0.009 Å으로 측정되었다. 한편, 최적 강도 평균횟수 20회에서는, 조도 P-V값 평균과 표준편차가 각각 5.14Å, 0.38Å, 조도 RMS값 평균과 표준편차가 각각 0.27Å, 0.001Å으로 감소 측정되었다. 최적 데이터 평균인 위상평균 30회, 강도평균 20회

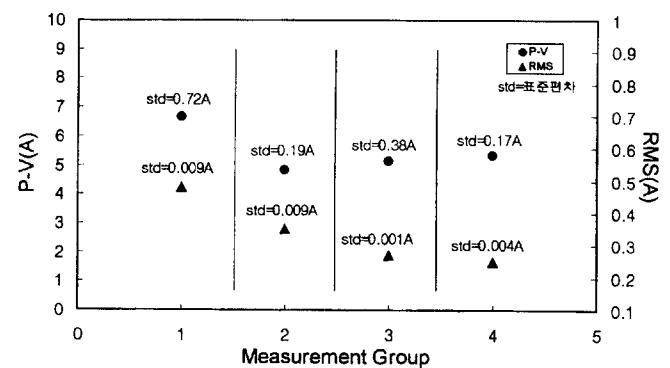


그림 8. Sub Å급 샘플에서의 위상 및 강도 평균횟수에 따른 조도측정 반복도 측정그룹: 1: 위상/강도 평균횟수=30/5, 그룹 2: 30/10, 그룹 3: 30/20, 그룹 4: 30/30.

에서의 조도측정 반복도는 0.01Å이하의 양호한 측정오차를 보임을 알 수 있다. P-V값은 기판의 세척상태나 측정과정 중 외부로부터의 오염원 유입 등에 매우 민감하게 반응하기 때문에 일반적으로 RMS값에 비해 반복성이 낮은 값을 보였으며, 서로 다른 데이터 평균사이에서도 RMS값과는 달리 변화의 경향성이 약하게 관측되었다.

이로서, 위상측정 간섭계로 평가한 최적 데이터 처리조건(위상평균 30회, 강도평균 20회)에서의 표면조도 sub Å급 샘플의 조도 측정값은 상당히 신뢰성 있는 수치임이 확인되었다.

IV. 결 론

위상측정 간섭계를 이용한 표면조도 RMS 수십 Å급 샘플과 sub Å급 초연마 반사경 기판의 조도평가 특성이 조사되었다. 표면조도 차이가 큰 두 샘플을 대상으로, 조도 측정값에 대한 위상측정 간섭계의 데이터평균 영향이 조사되었으며, 이로부터 측정오차를 최소화하여 정확한 측정을 수행할 수 있는 최적 데이터 평균조건이 도출되었다. 표면조도 수십 Å급 샘플의 경우, 조도 측정값은 데이터 평균의 영향을 적게 받은 반면, sub Å급 초연마 반사경 기판에서는 위상 및 강도 평균횟수 증가는 조도 측정값 표준편차의 감소와 동시에 측정 조도값의 감소를 보여주었다. 표면조도 sub Å급 반사경기판의 조도 정밀측정을 위한 최적 데이터 평균값은, 데이터 평균횟수의 증가와 함께 항상되던 측정 신뢰도가 안정적으로 수렴하는 경향을 뚜렷이 보이는, 위상평균 30회와 강도평균 20회로 확인되었다. 그 이상의 데이터 평균에 대해서는 측정오차의 추가 개선이 관측되지 않았으며, 외부의 오차요인이 개입되어 오히려 측정오차를 증가시키기도 하였다. 최적 데이터 평균인 위상평균 30회와 강도평균 20회 조건에서 측정된 초연마 반사경 기판의 조도값은 광학적 heterodyne 간섭계에 의한 측정 결과와도 잘 일치하였다. 이때의 조도측정 반복도 역시 0.01 Å 이하의 양호한 측정 표준편차를 보였다. 이상의 결과를 토대로, 위상측정 간섭계를 이용한 표면조도 sub Å급 반사경 기판의 신뢰성 있는 조도측정이 가능하게 되었다.

참고문헌

- [1] J. M. Bennett and J. H. Dancy, *Appl. Opt.* **20**, 1785 (1981).
- [2] B. Bhushan, J. C. Wyant, and C. L. Koliopoulos, *Appl. Opt.* **24**, 1489 (1985).
- [3] G. E. Sommargen, *Appl. Opt.* **20**, 610 (1981).
- [4] S. Tolansky, *Introduction to Interferometers* (Wiley, New York, 1973) pp. 213-214.
- [5] J. C. Wyant, C. L. Koliopoulos, B. Bhushan, and O. E. George, *ASLE Trans.* **27**, 101 (1984).
- [6] H. Sato, and M. O-Hori, *Ann. CIRP* **31**, 457 (1982).
- [7] P. de Groot, *J. Opt. Soc. Am. A* **12**, 354 (1995).
- [8] Y. Y. Cheng and J. C. Wyant, *Appl. Opt.* **24**, 3049 (1985).
- [9] Y. Y. Cheng and J. C. Wyant, *Appl. Opt.* **26**, 1112 (1987).
- [10] C. P. Brophy, *J. Opt. Soc. Am. A* **7**, 537 (1990).
- [11] C. Ai and J. C. Wyant, *Appl. Opt.* **27**, 3039 (1988).
- [12] J. Van Wingerden, H. H. Frankena, and C. Smorenburg, *Appl. Opt.* **30**, 2718 (1988).
- [13] P. de Groot, *Appl. Opt.* **34**, 4723 (1995).
- [14] *Maxim GP Optical Surface Profiler manual* (Zygo Corp., USA).
- [15] J. F. Biegen and R. A. Smythe, Fourth International Conference, Metrology and Properties of Engineering Surfaces National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, April 13-15, 1988.

Evaluation of surface roughness using phase-measuring interferometer for a few ten Å and sub Å-rough substrates

Min-Sik Jo, Tae-Ho Chung and Moon-Su Oh

First Technology Research Center, Agency for Defense Development, Taejon 305-600, Korea

(Received May 11, 1999, Revised manuscript received June 30, 1999)

We investigated the characteristics of surface roughness evaluation using phase-measuring interferometer for a few ten Å and sub Å-rough substrates. The influence of phase averaging and intensity averaging on the roughness measurement by phase-measuring interferometer was investigated and the optimal number of phase and intensity averaging for the least measurement error was searched. For a few ten Å-rough sample, roughness value did not depend so much on the data averaging. Whereas, measurement error for sub Å-rough sample was significantly improved as the number of phase and intensity averaging increased. At the phase averaging of 30 and the intensity averaging of 20, roughness value that measurement error was minimized was obtained, and it was in good agreement with that by optical heterodyne interferometer. Roughness measurement at the optimal data averaging showed also good repeatability error less than 0.01 Å.