

경사 단면 광섬유 광원을 이용한 피조 간섭계

김학용[†] · 김병창 · 김승우

한국과학기술원 기계공학과

Ⓣ 305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

(2001년 4월 24일 받음, 2001년 7월 20일 수정본 받음)

피조 간섭계의 측정 정밀도를 향상시키기 위해서 광 분할기를 제거한 형태의 피조 간섭계를 구현했다. 단일 모드 광섬유를 구면파 광원으로 사용했고 끝 단을 반사면으로 만들기 위해서 경면 가공했다. 반사면은 적당한 각도로 경사지게 가공되어 있는데 이것은 간섭무늬의 CCD관찰을 용이하게 한다. 경사 단면 광섬유 광원을 이용한 피조 간섭계는 기존의 피조 간섭계에 서 구면파를 왜곡시키는 광 분할기를 제거함으로써 측정 정밀도를 향상시킬 수 있었다. 또한 동일한 시편의 측정결과를 비교 함으로써 기존의 피조 간섭계로부터 개선된 정밀도를 정량적으로 구할 수 있었다. 그리고 경사 단면 광섬유 광원의 구면파 정도를 알아보기 위해서 PS/PDI(Phase Shifting/Point Diffraction Interferometer)를 구현함으로써 광원의 구면파 정도를 실험 적으로 검증했다.

분류코드 : SM.030.

I. 서 론

피조 간섭계^[1]는 대영역의 표면 형상 측정에 있어서 업계의 표준으로 알려져 있는 대표적인 측정 방법이다. 고가의 기준면 이 필요한 단점이 있지만 광학계가 간단하기 때문에 구현이 용 이하고 구면이나 평면, 그리고 약한 비구면의 측정 등에 호환 이 가능하다. 이미 CD나 DVD렌즈를 비롯한 비구면 렌즈 뿐 만 아니라 광학 평판(optical flat), 그리고 대부분의 렌즈와 미 러의 측정에 쓰이고 있다. 현재는 측정영역을 확대해야 하는 필요성이 대두됨에 따라 대영역을 정밀하게 측정할 수 있는 해결책으로 제시되고 있다. 미국의 NIST에서는 XCALIBIR (X-ray optics CALIBration InterferometER)라는 간섭계를 구 현하고 있는데 이것은 직경 300 mm의 구면 또는 평면에서 RMS 0.25 nm의 불확도를 목표로 하고 있다. NASA에서 개발 중인 우주 망원경의 대구경 미러와 LIGO(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)의 광학계 등 대영역을 고정 밀도로 측정해야 하는 분야에 활용될 것으로 알려진다. 한편 PDP, LCD 등의 디스플레이 분야에서는 그 영역이 점점 커지 는 추세에 있고 형상 정밀도 또한 높은 사양을 요구하고 있 기 때문에 가공기술과 더불어 대영역 표면 형상 측정기술은 반드시 수반되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 직경 60 mm의 평면 측정용 피조 간섭계를 구현했다. 그리고 광 분 할기에 의해 생기는 오차를 줄이기 위해 광섬유 광원의 앞 단 을 반사면으로 하는 간섭계를 구현했다. 또한 끝 단이 경사진 (이하 경사 단면) 광섬유 광원의 구면파 정도를 실험적으로 검 증했다.

II. 경사 단면 광섬유 광원의 구면파 검증

2.1. 파면 측정 이론

경사 단면을 갖는 광섬유 광원을 사용하기 위해서는 형성되 는 파면의 형태가 구면파라는 가정을 하게 된다. 본 논문에서 는 경사 단면 광섬유 광원의 구면파 정도를 알아보기 위해서 파면을 측정하는 실험을 해 보았다. 파면을 측정하기 위해서 층밀리기 간섭계(Lateral shearing interferometer)^[1]를 이용할 수도 있지만 광학계가 복잡하고 그 차체가 수차 유발원이 되 기 때문에 바람직하지 못하다. 따라서 본 실험에서는 측정하 고자 하는 구면파 광원 이외에 광학계가 거의 불필요한 점회 절 간섭계(Point diffraction interferometer)^[1]를 응용해서 위상 천이가 가능한 PS/PDI(Phase shifting/point diffraction interferometer)^[2]를 구현했다. 이 방법의 특징은 우선 측정하 고자 하는 광학계 또는 광원 이외에는 렌즈나 미러 등이 불필 요하기 때문에 광학계 자체의 오차를 최소화할 수 있다. 그리 고 구면파를 기준파면으로 삼기 때문에 기준면의 형상오차에 의해 측정 정밀도가 결정되지 않는다. 또한 광섬유의 구면파 를 기준파면으로 하면 측정 정밀도면에서 $\lambda/1000$ 를 보장할 수 있다고 보고되고 있다.^[3]

본 실험에서는 광섬유 광원을 기준 구면파로 사용하고 경사 단면 광섬유 광원을 측정파면으로 해서 PS/PDI를 구현했다. 두개의 광원은 서로 광축이 일치하지 않고 광섬유의 직경 정 도에 해당하는 만큼 떨어져서 위치하게 되는데 이것은 결국 파면을 측정하는데 있어서 수차로 나타난다. 대부분의 수차는 기울기(tilt)와 코마(coma)로서 이 값들은 두 광원의 상대적인 위치만 알 수 있다면 해석적으로 예측할 수가 있다.^[4] 그리고 두 개의 광원을 모두 구면파 광원으로 하게 되면 시스템 오차 만을 얻을 수 있으므로 이런 수차를 제거하면 측정하고자 하 는 경사 단면 광섬유 광원의 파면을 얻을 수가 있게 된다. 이

[†]E-mail: forgood@pem.kaist.ac.kr

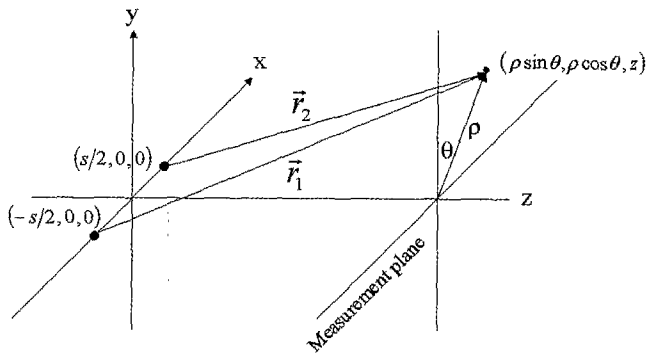


그림 1. 측정면의 좌표계.

실험은 그림 1처럼 영의 이중 슬릿 실험(Young's two-slit experiment)과 유사하다.

두 개의 점광원이 x 방향으로 s 만큼 떨어져 있다고 할 때 측정평면의 한 점에서의 광경로차 $\Delta r = |r_2| - |r_1|$ 는 측정평면의 극좌표계(ρ, θ)에서 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta r = |r_2| - |r_1| = \sqrt{\left(\rho \sin \theta - \frac{s}{2}\right)^2 + (\rho \cos \theta)^2 + z^2} - \sqrt{\left(\rho \sin \theta + \frac{s}{2}\right)^2 + (\rho \cos \theta)^2 + z^2} \quad (1)$$

위의 식을 2차항까지 이항정리하면

$$\Delta r = \left\{ \frac{s}{2z} \rho^3 - \left[\frac{s}{z} - \left(\frac{s}{2z} \right)^2 \right] \rho \right\} \sin \theta \quad (2)$$

한편, Δr 을 Zernike 다항식 중 코마와 기울기로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta r = \left\{ C \left[3 \left(\frac{\rho}{r_m} \right)^3 - 2 \frac{\rho}{r_m} \right] + T \frac{\rho}{r_m} \right\} \sin \theta \quad (3)$$

여기서 C는 Zernike 다항식에서 x방향으로의 코마 항 계수이고 T는 y방향 기울기에 해당하는 계수이다. 그리고 r_m 은 측정평면에서의 Zernike 파면맞춤을 하는 원의 반지름을 나타낸다. 식 (2)와 식 (3)으로부터 두 광원이 서로 떨어져있기 때문에 생기는 기하학적 코마는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C = \frac{s}{6} \left(\frac{r_m}{z} \right)^3 \quad (4)$$

그리고 위의 식은 광원의 개구수(NA)가 작다는 가정 하에 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$C = \frac{s}{6} \tan^3 [\sin^{-1}(NA)] \approx \frac{1}{6} s NA^3 \quad (5)$$

본 실험에서 사용하는 광섬유 광원은 개구수가 0.12로서 위의 식으로부터 예상할 수 있는 기하학적 코마 값은 s가 125 μm 일 때 0.05687waves이다. 이러한 코마 값은 원하는 정밀도로 파면을 획득하기 위해서 반드시 제거되어야 한다.

2.2. 측정 시스템의 설계 및 구성

그림 2는 경사 단면 광섬유 광원의 파면을 측정하기 위한

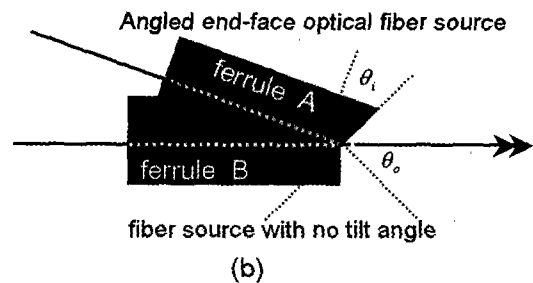
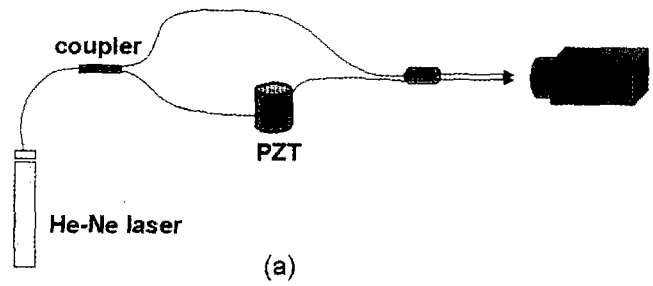


그림 2. 경사 단면 광섬유 광원의 파면을 측정하기 위한 PS/PDI의 개략도.

PS/PDI의 개략도를 보여주고 있다. 광원은 He-Ne 레이저로서 단일모드 광섬유에 집광된 후 커플러에 의해 50:50으로 분기된다. 한쪽은 수 m 정도를 튜브형 압전소자에 감아서 위상차이를 할 수 있도록 했다. 분기된 각각의 광섬유는 페룰(ferrule)에 고정되어 있고 이 두개의 페룰은 서로 광섬유가 최대한 가까이 접근할 수 있도록 가공되었다. 그리고 경사 단면 광섬유 광원을 얻기 위해서 한쪽 페룰은 끝 단이 경사지게 가공이 되어 있고 이 가공면을 따라서 광섬유를 연마하게 된다.

경사 단면 광섬유 광원에서 나오는 광선은 Snell의 법칙에 따라서 굴절되기 때문에 페룰의 길이방향으로부터 해당 각도만큼 꺾여서 진행하게 된다. 따라서 광원의 확대 그림에서도 볼 수 있듯이 기준 구면파를 형성하는 다른 광섬유 광원과 간섭을 일으키기 위해서 그 만큼의 각도로 엇갈려서 설치하게 된다.

2.3. 측정 결과 및 오차 분석

먼저 두 광원이 모두 구면파인 경우에 실험을 해 보았다. 그림 3은 CCD로부터 얻은 간섭무늬와 동일한 조건에서 30번의 반복 실험을 통해서 얻은 Zernike 계수를 보여주고 있다. 코마항이 가장 크게 나왔고 나머지 항들은 1/100이내의 크기를 나타낸다. 고차항 성분들이 두드러지게 나타났는데 이것은 물론 CCD 소자 앞에 붙어 있는 얇은 유리판에 의해서 파면에 수차가 유발된 것도 있지만 그 유리판과 CCD사이에 다중 반사가 일어나면서 생기는 둥근 간섭무늬때문에 그 영향이 더욱 커졌다고 볼 수 있다.

다음으로 경사 단면 광섬유 광원과 구면파 광원의 PS/PDI 실험을 해 보았다. 그림 4는 실제 간섭무늬와 동일한 조건에서 30번의 반복 실험을 통해서 얻은 Zernike 계수를 나타낸다.

역시 코마가 가장 크게 나왔고 고차항 성분들도 크게 나온 것을 볼 수 있다. 그림 5는 그림 3의 결과와 그림 4의 결과

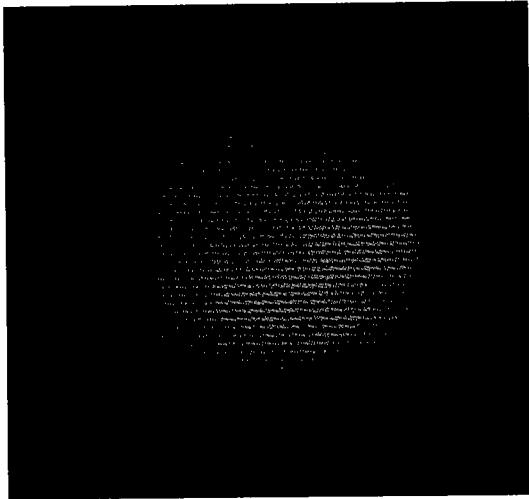


그림 3. 두 구면과 광원에 의한 간섭무늬와 Zernike 계수.

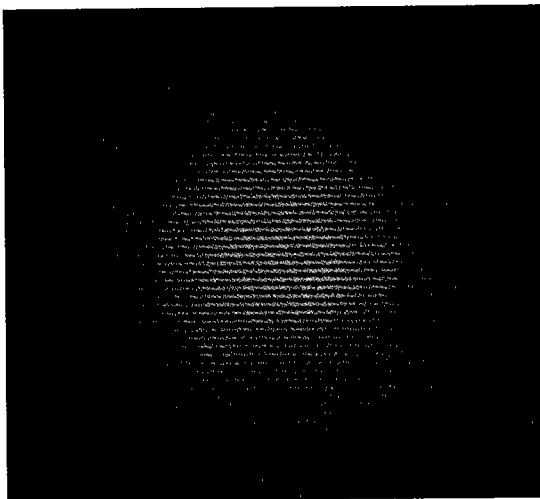
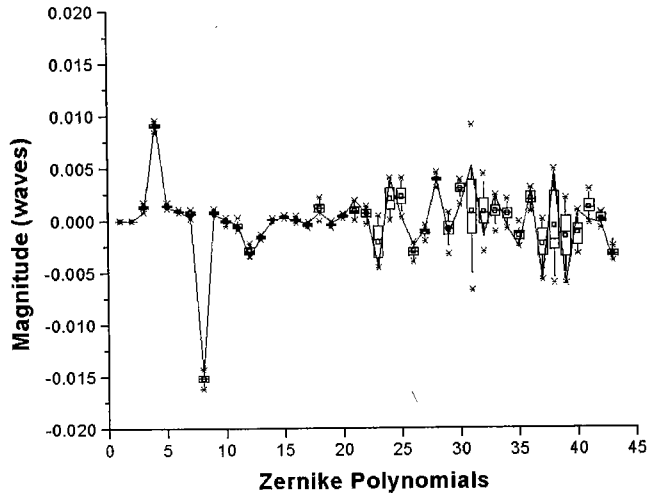


그림 4. 경사 단면 광원과 구면과 광원에 의한 간섭무늬와 Zernike 계수.

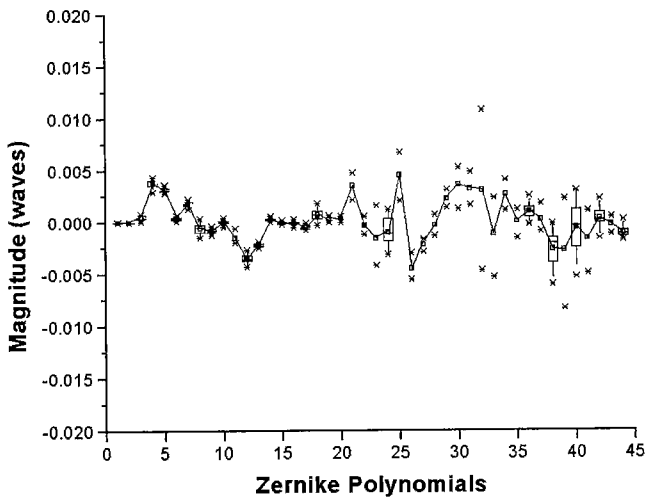
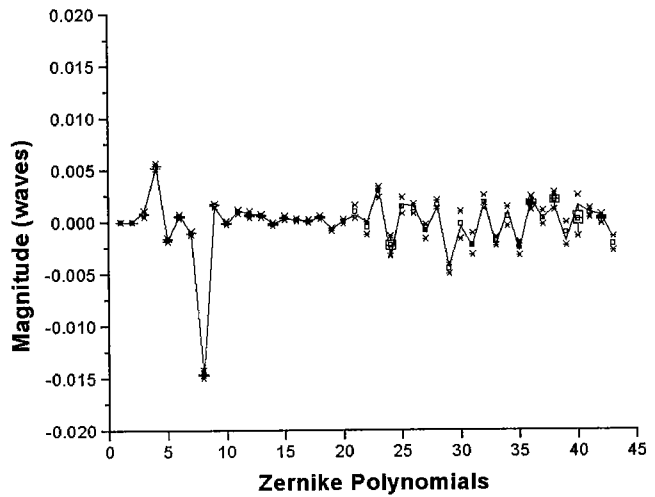


그림 5. 구면과 광원으로부터 얻은 Zernike 계수와 경사 단면 광섬유 광원으로부터 얻은 Zernike 계수의 차.

의 각 항별 차를 나타낸 그래프로서 구면과 광원으로부터 얻은 Zernike 계수와 경사 단면 광섬유 광원으로부터 얻은 Zernike 계수의 차를 보여준다.

20차 항 이하의 경우 모든 값들이 $\lambda/200$ 이내로 들어오는 것을 알 수가 있고 그 이상의 고차항들은 비록 큰 값을 보이고 있지만 표준편차가 크기 때문에 불규칙 오차로 무시할 수 있다. 위의 결과로부터 경사 단면 광섬유 광원은 $\lambda/200$ 의 측정 오차 범위 내에서 구면파라고 판단할 수 있다. 하지만 두 실험 간의 정렬오차를 감안하면 이보다 더 작은 값을 예상할 수 있고 따라서 피조 간섭계에서 원하는 정도 범위 내로 구면파를 보장할 수 있으므로 경사 단면 광섬유 광원을 피조 간섭계의 광원으로 사용해도 무리가 없다고 판단할 수 있다.

III. 평면 측정용 피조 간섭계

3.1. 시스템 설계 및 구성

구성된 피조 간섭계의 광원은 파장 633nm의 He-Ne 레이저

이고 편홀 대신 단일모드 광섬유를 구면과 광원으로 사용했다. 피조 간섭계에서 기준파면을 만들기 위해 기준면에는 부분적으로 반사와 흡수 그리고 투과를 할 수 있는 광학박막이 형성되어야 한다. 그리고 오로지 측정파면과 기준파면 만이 간섭을 일으켜야 하기 때문에 기준면과 측정면 사이에서는 다중 반사가 일어나지 않도록 해야한다.^[6] 본 실험에서 사용한 기준면에는 측정면의 반사도에 둔감하고 높은 가시도를 낼 수 있는 광학박막^[6]을 적용했다.

측정면의 파면을 복원하기 위해서는 기준면이나 측정면의 광로정을 임의로 바꾸어서 간섭신호의 위상을 변화시키는 위상천이 기법을 적용하게 된다. 대표적으로 5 또는 7-bucket 알고리즘이 있는데 이것은 위상 천이량이 일정해야 하고 위상오차를 보상해야 하는 번거로움이 있다.^[7] 그래서 본 실험에서는 위상오차의 영향을 받지않는 임의위상 측정 알고리즘^[8]을 적용해서 파면을 복원했다. 그리고 측정면 대신 기준면을 파면에 수직인 방향으로 이동시키는 방법을 사용했고, 이를 위해서 기준면을 부착하기 위한 구동부를 설계하였다. 그림 6(a)는 구성된 평면 측정용 피조 간섭계의 개략도를 보여주고 있다. 단일모드 광섬유로부터 나온 구면파는 광 분할기를 통과하여 초점거리가 301 mm인 렌즈를 거쳐 평면파로 바뀌게 된다. 그리고 위상천이 구동부에 설치된 기준면에 의해 10%는 반사하고 20%는 흡수, 그리고 나머지 70%는 그대로 통과하게 된다. 통과된 파면은 바로 뒤에 위치한 측정면에서 측정면의 반사도에 따라 일부는 반사하고 나머지는 통과하게 된다. 기준면과 측정면에서 나온 파면은 간섭을 일으키게 되고 이 간섭무늬는 광 분할기를 통해 CCD렌즈로 측정면을 결상함으로써 관찰할 수 있다. 단일모드 광섬유 광원으로부터 나오는 구면파는 CCD 카메라로 간섭무늬 관찰을 위해 설치한 광 분할기에 의해서 수차가 유발되어^[9] 렌즈로 입사하게 된다. 광 분할기에 의해서 왜곡된 파면은 결국 형상의 측정에 오차를 유발하게 되고 이러한 오차는 대영역을 정밀하게 측정하는 데 있어서 치명적일 수 있다. 따라서 본 실험에서는 그림 6(b)와 같이 수차 유발원인 광 분할기를 제거한 형태의 피조 간섭계를 구현해서 기준평면을 측정하고 기존의 피조 간섭계로부터 얻은 결과와 비교함으로써 개선된 정밀도를 관찰할 수 있었다.

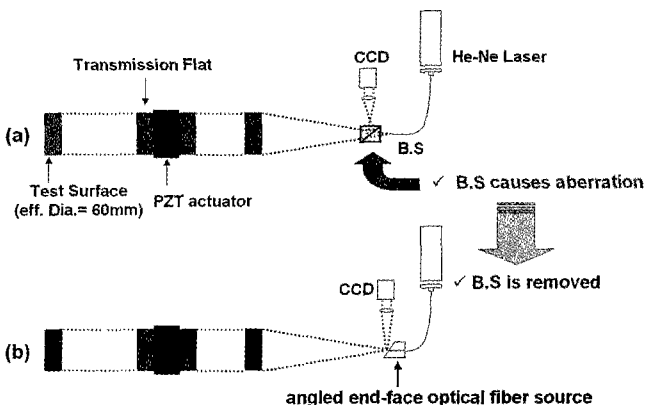


그림 6. 평면 측정용 피조 간섭계의 구성도.

IV. 경사 단면 광섬유 광원을 이용한 피조 간섭계

끝 단이 경사진 광섬유로부터 나오는 광선의 진행방향은 코어의 굴절률과 클래딩의 굴절률이 거의 같다고 했을 때($n_{co} \approx n_{cl}$) Snell의 법칙을 따르게 된다.^[10] 광섬유의 끝 단이 θ_0 의 각도로 경사져 있을 때 광선은 단면 법선에 대해서 θ_0 의 각도로 진행하게 된다. 따라서 경사 단면 광섬유 광원을 사용할 경우에는 경사각도를 고려해서 광원을 정렬할 필요가 있다. 광섬유의 굴절률이 1.46이고 θ_0 가 28.97°일 경우에 $n \cdot \sin\theta = \sin\theta_0$ 에 의해서 θ_0 의 값은 45°가 된다. 이 때 측정물체로부터 돌아오는 광선은 광섬유의 경사단면에 의해 직각으로 반사되어 CCD 카메라로 관찰이 용이해진다. 본 실험에서는 직경 125 μm 광섬유용 페룰(ferrule)에 단일모드 광섬유를 넣어서 사용했고 이 페룰은 실린더 형태의 stainless steel 지그에 고정시켜서 사용했다. 앞 단은 반사면을 만들기 위해서 연마를 했고 그 모습은 그림 7과 같다.

V. 측정 결과

위의 광 분할기를 제거한 경사 단면 광섬유 광원을 이용한 피조 간섭계와 기존의 피조 간섭계의 측정결과를 비교한 것은 그림 8과 같다. 측정시편은 직경 60 mm의 반사도가 4%인 평판유리로서 첫 번째 가로축은 기존의 피조 간섭계로부터 얻은 결과이고 두 번째 가로축은 광 분할기를 제거한 경사 단면 광섬유를 이용한 피조 간섭계로 측정한 결과이다. PV값은 $0.261 \mu\text{m} \pm 0.0216$ 이고 기존의 피조 간섭계로 측정한 PV값인 $0.329 \mu\text{m} \pm 0.00529$ 와 비교해볼 때 26%가량 줄어든 것을 알

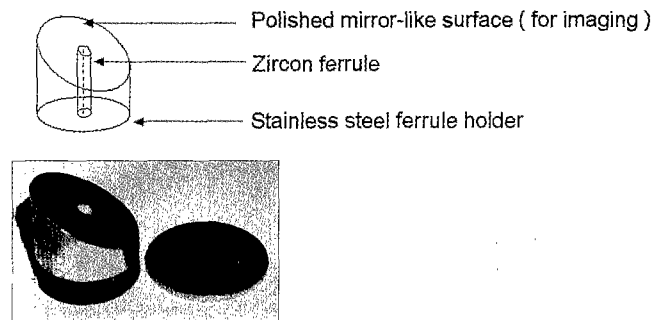


그림 7. 경사 단면 광섬유 광원의 모습.

| | Interferogram | Reconstructed wavefront | PV & RMS |
|-----------------------------|---------------|-------------------------|--|
| Original Setup (with B.S) | | | PV : 0.329 $\mu\text{m} \pm 0.00529$ RMS : 0.0785 $\mu\text{m} \pm 0.00113$ |
| Revised Setup (without B.S) | | | PV : 0.261 $\mu\text{m} \pm 0.0216$ RMS : 0.0586 $\mu\text{m} \pm 0.00701$ |

그림 8 기존의 피조 간섭계와 경사 단면 광섬유를 이용한 피조 간섭계의 측정결과.

수 있다. 경사 단면 광섬유 광원은 검증결과에 의해 구면파 광원으로 볼 수 있으므로 위와 같은 측정결과와의 차이는 대부분 광 분할기에 의한 것으로 볼 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 대영역에서 고정밀도를 보장해야 하는 미러 등의 광학계나 실리콘 웨이퍼의 형상을 측정하기 위한 평면 측정용 피조 간섭계를 구현했다. 간섭무늬의 가시도를 높이기 위해서 기준 반사면은 특수하게 코팅을 했고 측정면의 반사도에 둔감한 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 광원 앞 단에 있는 광 분할기 때문에 구면파에 수차가 생기면서 측정결과에 오차를 유발하게 되었고 이것을 개선하기 위해서 경사 단면 광섬유 광원을 이용한 피조 간섭계를 구현했다. 그리고 기준평판을 측정해서 얻은 결과를 비교함으로써 광 분할기에 의한 측정오차를 정량적으로 구할 수 있었다. 또한 경사 단면 광섬유 광원의 구면파 정도를 PS/PDI를 구현함으로써 검증했다.

참고문헌

[1] Daniel Malacara, *Optical Shop Testing 2nd ed* (John Wiley Sons, Inc, 1992), Chapter 3.
 [2] H. Medeck, E. Tejniil, K. A. Goldberg, and J. Boker, "Phase-shifting point diffraction interferometer," *Opt. Lett.*,

vol. 21, no. 19, pp. 1526-1528, 1996.
 [3] Gary E. Sommargren, "Phase shifting diffraction interferometer," U.S. patent 5548403, 1996.
 [4] Patrick P. Naulleau and Kenneth A. Goldberg, "Extreme-ultraviolet phase-shifting point-diffraction interferometer: a wave-front metrology tool with subangstrom reference-wave accuracy," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 35, pp. 7252-7263, 1999.
 [5] Chiayu Ai and James C. Wyant, "Effect of retroreflection on a Fizeau phase-shifting interferometer," *Appl. Opt.*, vol. 32, no.19, pp. 3470-3478, 1993.
 [6] Biegen, "Coating and method for testing plano and spherical wavefront producing optical surfaces and systems having a broad range of reflectivities," U.S. patent 4820049, 1989.
 [7] R. Arnold Nicolaus, "Precise method of determining systematic errors in phase-shifting interferometry on Fizeau interferences," *Appl. Opt.*, vol. 32, no. 31, pp. 6380-6386, 1993.
 [8] In-Bok Kong and Seung-Woo Kim, "General algorithm of phase shifting interferometry by iterative least-squares fitting," *Opt. Eng.*, vol. 34, no. 1, pp. 183-199, 1995.
 [9] Joshep Braat, "Analytical expressions for the wave-front aberration coefficients of a tilted plane-parallel plate," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 32, pp. 8459-8466, 1997.
 [10] A.W. Snyder and J.D. Love, *Optical Waveguide Theory* (Chapman & Hall, New york, 1983), pp. 422-424.

Fizeau interferometry using angled end-face optical fiber source

Hagyong Kihm[†], Byoung-Chang Kim, and Seung-Woo Kim

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

[†]E-mail: *forgood@pem.kaist.ac.kr*

(Received April 24, 2001 ; Revised manuscript received July 20, 2001)

A Fizeau interferometer without beam splitter was constructed. Single-mode optical fiber was used as a spherical wave source and the face of fiber end was polished and coated to be a reflecting surface. The reflecting surface was angled so that interference fringe could be detected by CCD camera. Beam splitter in front of a spherical wave source could distort the wave front and that was one of the component error sources. With the proposed configuration there was no need to place beam splitter in the system. Improvement of phase measuring accuracy was evaluated quantitatively by comparing the result of this setup with that of a conventional Fizeau interferometer. Wave front of the angled end-face optical fiber source was also measured to verify its sphericity by PS/PDI (Phase Shifting/Point Diffraction Interferometer). The principle of this technique was presented and the experimental results and its applications were discussed.

Classification code : SM.030.