

# 펄스 레이저를 이용한 비동일 광경로 저결맞음 간섭계

오정석\*, 김승우(한국과학기술원 기계공학과)

## Unequal-path Low-coherence Interferometry Using Femtosecond Pulse Lasers

J. S. Oh, S. W. Kim (Mechanical Eng. Dept., KAIST)

### ABSTRACT

We discuss two possibilities of using femtosecond pulse lasers as a new interferometric light source for enhanced precision surface profile metrology. First, a train of ultra-fast laser pulses yields repeated low temporal coherence, which allows performing unequal-path scanning interferometry that is not feasible with white light. Second, high spatial coherence of femtosecond pulse lasers enables to test large size optics in non-symmetric configurations with relatively small size reference surfaces. These two advantages are verified experimentally using Fizeau and Twyman-Green type scanning interferometers.

**Key Words:** Femtosecond laser(펄스 레이저), Low-coherence interferometry(저결맞음 간섭계), Repetition rate(반복율), Fringe peak(위상정점), Envelope peak(가시도 정점)

### 1. 서론

헬륨네온 레이저나 레이저 다이오드를 주된 광원으로 하는 단색광 간섭계는 위상천이법(phase-shifting method)과 함께 사용되어 높은 측정정도를 보여 주기 때문에 대부분의 트와이만-그린 간섭계(Twyman-Green interferometer)나 피조 간섭계(Fizeau interferometer)에 채택되어 널리 사용되고 있다. 단색광원의 우수한 시간(temporal) 및 공간결맞음성(spatial coherence)으로 인해 측정대상물은 기준면에 대해 임의의 위치에 놓여질 수 있으며 정렬이 용이해 간섭계 구성이 매우 쉽다는 장점을 가지고 있다. 반면에 광원의 우수한 시간결맞음성은 위상 모호성(phase ambiguity)으로 인한 단차 측정에서의 높이 제한 및 투명판에서의 앞, 뒷면의 다중반사로 인한 간섭무늬의 왜곡 등 단점 또한 유발하게 된다.

단색광원의 단점을 해결할 수 있는 하나의 방법은 광원을 분광대역폭(spectral bandwidth)이 넓은 부분적 결맞음광(partially coherent light) 또는 백색광(white light)으로 대체하는 것이다. 이 경우 광원의 짧은 시간결맞음길 이로 인해 간섭무늬는 기준부와 측정부의 광경로 차가 거의 0 에 근접할 때만 나타나게 되며 따라서 상기한 단차나 투명판을 측정할 때의 문제점들을 해결할 수 있다.

이러한 장점으로 인해 백색광 간섭계는 미세형상의 측정에 광범위하게 응용되고 있지만 대영역형상측정에 있어서는 그 활용이 크게 제한되고 있는 실정이다. 첫 번째 이유는 짧은 시간결맞음길이에 기인하는 것으로 피조 간섭계의 경우 구조적으로 광경로지연<sup>1</sup>이나 멀티모드동작<sup>2</sup>(multimode operation)이 수반되지 않으면 동일 광경로를 만들 수 없고, 트와이만-그린 간섭계의 경우에도 큰 곡률의 구면을 측정할 경우 기준면도 광분할기에 대해 멀리 떨어져 있어야 하는 문제를 초래한다. 두 번째는 주로 광원의 크기가 큰 할로겐 램프 등의 백열광원을 사용할 때 발생하는 문제로, 낮은 공간결맞음성으로 인해 피조 간섭계의 경우는 기준면과 측정면 사이의 갭에 제약이 가해지고, 트와이만-그린 간섭계의 경우는 간섭계가 광분할기를 기준으로 대칭적으로 구성되어야 한다는 제한점을 가지고 있다. 이 경우 측정면이 클 경우 기준면도 커져야 하므로 그 유용성을 크게 제약하게 된다.

이상의 관점에서 볼 때 펄스 레이저는 대영역형상측정용 저결맞음 간섭계를 구성하는데 있어 매우 적합한 광원이다. 본 연구에서는 정밀형상측정에서 새로운 간섭광원으로서의 펄스 레이저의 두 가지 가능성에 대하여 논하였다. 첫 번째, 극단초펄스열은 주기적인 낮은 시간결맞음성을 가지고 있

고 이에 따라 기존의 백열광원으로는 불가능하였던 비동일 광경로 저결맞음 간섭계를 구성할 수 있다. 두 번째로, 펨토초 레이저의 높은 공간결맞음성은 비대칭적인 간섭계 구성을 가능하게 하여 상대적으로 작은 기준면을 가지고도 큰 면적의 형상을 측정할 수 있다. 이와 같은 두 가지의 장점은 피조 및 트와이만-그린 형식의 주사간섭계(scanning interferometer)를 통하여 실험적으로 검증되었다.

## 2. 펨토초 레이저의 특성

### 2.1 펨토초 레이저의 광대역 특성

펨토초 레이저의 시간 및 공간영역에서의 특성을 Fig. 1에 나타내었다. 시간영역에서 짧은 펄스의 형태를 가지고 있는 펨토초 레이저는 주파수 영역에서 넓은 범위에 걸쳐 등 간격으로 분포하고 있는 주파수 빔(frequency comb)들의 모드동기(mode lock)된 조합으로 나타낼 수 있다. 이 때 펄스의 반복율(repetition rate)  $v_{rep}$  및 주파수대역  $\Delta\nu$ 와 펄스폭  $\Delta t$ 의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{rep} = c/2L_c \quad (1)$$

$$\Delta t \cdot \Delta\nu \geq K \quad (2)$$

$c$ 는 광속이고  $L_c$ 는 펨토초 레이저의 공진기 길이이다.  $K$ 는 펄스의 형태에 따라 달라지며 가우시안 펄스의 경우 0.441에 해당하는 값을 가진다.<sup>3</sup>

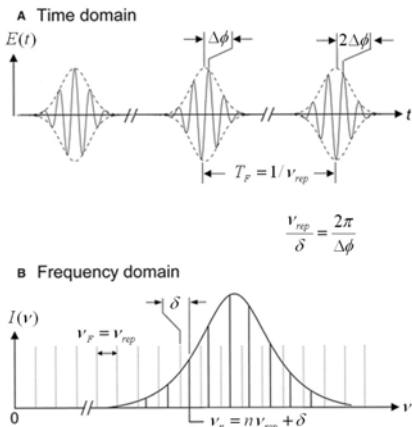


Fig. 1 Characteristics of femtosecond lasers in time and frequency domain

식 (2)에서 알 수 있듯이 펄스폭과 주파수대역은 서로 반비례하는 관계를 가진다. 중심파장 800 nm에 10 fs의 펄스는 약 100 nm의 넓은 파장대역을 가지게 되며 이는 실질적으로 저결맞음 간섭계에 충분히 사용 가능할 정도로 넓은 대역이다.

### 2.2 펨토초 레이저의 주기적인 시간결맞음성

광대역 광원이라는 특징 외에 펨토초 레이저는 주기적인 낮은 시간결맞음성의 특징 또한 가지고 있다. Wiener-Khinchin theorem에 의하면 점광원(point source)의 시간결맞음함수  $G(\tau)$ 는 광원의 세기분광밀도(power spectral density)  $S(\nu)$ 와 푸리에 변환 쌍(Fourier transform pair)를 구성한다.

$$S(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\tau) \exp(-j2\pi\nu\tau) d\tau \quad (3)$$

여기서  $\tau$ 는 시간지연(time delay)이다. 식 (3)에서 알 수 있듯이 광원의 스펙트럼이 주기적인 분포를 가지면 시간결맞음함수 역시 주기적인 분포를 가지게 된다.

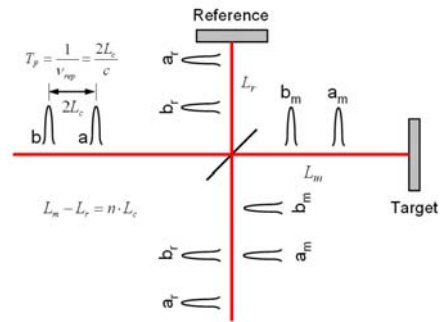


Fig. 2 Requirements for pulse-to-pulse interference

이는 시간 영역에서는 Fig. 2와 같이 서로 다른 펄스가 만나서 간섭을 일으키는 것으로 설명할 수 있다. 식 (1)에서 보듯이 펄스 사이의 거리는 펨토초 레이저의 공진기 길이의 두 배인  $2L_c$ 이므로 피조 간섭계나 트와이만-그린 간섭계에서 기준부와 측정부 사이의 거리 차를 펨토초 레이저의 공진기 길이의 정수배로 조절할 경우 비동일 광경로에서도 저결맞음 간섭무늬를 얻을 수 있다.

## 3. 펨토초 레이저를 이용한 비동일 광경로 저결맞음 간섭계

Fig. 3(a)는 서로 다른 펄스끼리의 간섭을 이용한 저결맞음 피조 간섭계의 구성을 보여 준다. 사용한 펨토초 레이저는(FEMTOLASERS, Inc., FEMTOSOURCE Scientific PRO) 10.5 fs의 펄스 폭에 797 nm의 중심파장을 기준으로 110 nm 정도의 파장대역을 가지고 있다. 펨토초 레이저의 반복율은 75 MHz로 유효 공진기 길이는 약 2 m이다. 펨토초 레이저는 감쇠기(attenuator)를 통해 광량이 조절된 후 단일모드 광섬유로 집광되고 시준렌즈(collimating lens)를

거쳐서 평행광이 된다. 이후 대물렌즈와 시준렌즈를 거쳐 확대된 후 기준면과 측정면에서 각각 반사되어 CCD 에 간섭무늬를 형성하게 된다. 이때 저결맞음 간섭무늬를 얻기 위한 조건은 다음과 같다.

$$L = nL_c \quad (4)$$

$L$  은 피조 간섭계의 기준면과 측정면사이의 갭이다. 펄스초 레이저의 시간결맞음길이 가 매우 짧기 때문에 기준면에 대해 측정면이 2 m 떨어진 상태에서 백색광 간섭무늬를 한번에 얻는 것은 매우 힘들다. 이 문제를 해결하기 위하여 헬륨네온 레이저를 이용하여 간섭무늬를 일단 형성하고 반측폭(FWHM)이 1.5 nm 인 간섭필터를 사용하여 측정면의 광축방향 위치를 조절하였다. Fig. 3(b)는 서로 다른 펄스거리의 간섭을 이용한 구면측정용 비동일 광경로 비대칭 트와이만-그린 간섭계의 구성을 보여 준다.

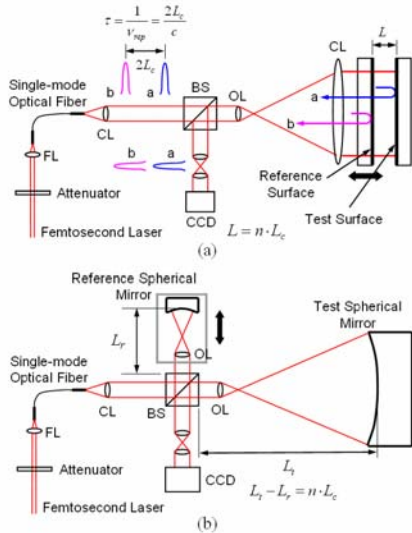


Fig. 3 Scanning interferometers that use femtosecond laser pulses: (a) unequal-path Fizeau configuration, (b) unequal-path nonsymmetric Twyman-Green configuration

#### 4. 실험결과 및 분석

##### 4.1 비동일 광경로 저결맞음 간섭계의 구현

Fig. 4 는 Fig. 3(a)의 구성을 이용하여 BK7 으로 만들어진 투명판을 측정하였을 때, CCD 중심 인근의 임의의 화소에서 얻은 간섭신호를 보여 준다. 동일광경로 조건을 만족시키지 못함에도 불구하고 깨끗한 저결맞음 간섭신호를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림의 오른쪽 상단은 가시도가 최대인 위치

에서 얻은 간섭무늬를 보여 준다. 평행판 뒷면에서 반사된 광은 식 (4)의 간섭조건을 만족시키지 않으므로 그 영향이 배제된 깨끗한 간섭무늬를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 서로 멀리 떨어진 펄스 간의 간섭을 이용할 경우는 펄스초 레이저의 반복율의 안정화를 고려해야 하며 이는 공진기 길이의 안정화를 통해 달성할 수 있다.<sup>4</sup>

저결맞음 간섭계 구성에서 가장 중요한 고려사항 중의 하나는 간섭계의 분산 불일치(dispersion mismatch)로 인한 간섭신호의 왜곡이다. Fig. 3(a)의 구성의 경우 기준면과 측정면 사이에는 공기만 존재하므로 특별히 분산의 불일치는 발생하지 않는다.

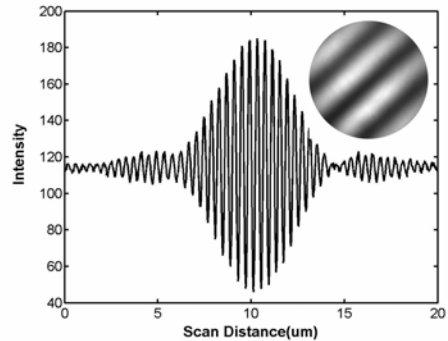


Fig. 4 Typical temporal interferogram sampled with scanning from a single pixel of the CCD camera. Inset, spatial interferogram capture instantaneously by use of whole pixels of the CCD camera

##### 4.2 비대칭 구성에서 공간결맞음성의 영향

비동일 저결맞음 간섭계에서 주기적인 스펙트럼 외에 광원에 요구되는 또 하나의 특성은 우수한 공간결맞음성이다. 공간결맞음성이 부족할 경우 피조 갭이 커지거나 트와이만-그린 간섭계의 구성이 비대칭적일 경우 좋은 가시도를 얻기 힘들다. 비대칭 간섭계에서의 공간결맞음성의 영향을 분석하기 위해 Fig. 3(b)의 구성을 이용하였다. 공간결맞음성이 낮은 할로겐 램프와의 비교를 위해 동일광경로 ( $L_r=L_t$ )로 구성하였으며 기준면과 측정면의 곡률의 차이를 이용하여 간섭계를 비대칭적으로 구성하였다. 측정구면거울은 곡률반경 200 mm, 직경 50 mm, 기준구면거울은 곡률 25 mm, 직경 25 mm 의 알루미늄 거울이 사용되었으며 기준부와 측정부의 분산량을 일치시키기 위하여 동일한 대물렌즈(Mitutoyo, M Plan NIR 10X)를 사용하였다.

Fig. 5(a)는 펄스초 레이저를 단일모드 광섬유에 입사시켜 얻은 간섭 무늬이다. 펄스초 레이저를 이용하여 얻은 간섭무늬의 경우 짧은 시간결맞음길이에 의해 기생간섭무늬가 배제된 우수한 간섭무늬를

얻을 수 있음을 알 수 있다. 이에 반해 할로겐 램프의 광을 700  $\mu\text{m}$  의 코어 직경을 가진 다중모드 광섬유에 입사시켰을 경우(Fig. 5(b))에는 간섭무늬를 얻을 수 없었으며, 200  $\mu\text{m}$  의 코어직경을 가진 다중모드 광섬유에 입사시켰을 경우(Fig. 5(c))에는 가시도가 극히 나쁜 결과를 보였다. Fig. 5(d)는 할로겐 램프의 광을 단일모드광섬유로 입사시켰을 때의 결과로 가시도는 좋았지만 극도로 나쁜 광효율로 인해 충분한 광량을 얻을 수 없었다.

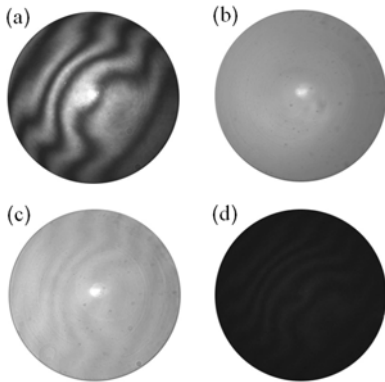


Fig. 5 Comparison of spatial interferogram obtained from different sources for a spherical mirror

### 4.3 정점검출 알고리즘의 영향

획득된 간섭신호로부터 측정대상의 형상오차를 계산하는 방법은 크게 군속도(group velocity)와 관계된 가시도정점<sup>5</sup>(envelope peak)을 검출하는 방법과 위상속도(phase velocity)와 관계된 위상정점<sup>6</sup>(fringe peak)을 검출하는 방법으로 구분할 수 있다.

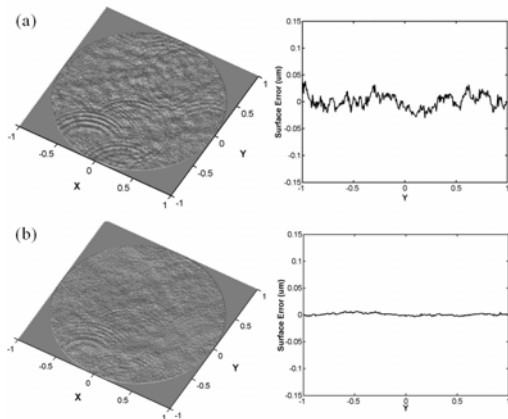


Fig. 6 Measured surface maps with sectional profiles obtained by (a) envelope peak detection and (b) fringe peak detection

두 방법을 비교하기 위하여 앞서 사용했던 투명판

의 형상오차를 계산하였으며 Fig. 6(a)는 가시도정점을 이용한 측정결과 Fig. 6(b)는 위상정점을 검출한 결과를 각각 보여 준다. 결과에서 확연히 드러나듯이 위상정점을 이용한 결과는 RMS(root-mean-square) 3.1 nm 의 상당히 좋은 결과를 보였으나 가시도정점을 이용한 결과는 RMS 15.4 nm 로 요동이 심한 결과를 보였다. 이는 백색광 간섭계에서도 비슷하게 나타나는 현상으로 간섭신호에서의 민감도 차이로 설명될 수 있다.

## 4. 결론

펨토초 레이저는 광대역 광원으로 우수한 공간 결맞음성 및 주기적인 낮은 시간결맞음성을 가지고 있어 비동일 광경로 저결맞음 간섭계에 매우 적합한 광원이다. 본 연구에서는 펨토초 레이저를 이용하여 기존의 백열광원으로는 힘들었던 저결맞음 피조 간섭계를 구현하였고 비대칭적 트와이만-그린 간섭계 구조하에서도 가시도가 높은 우수한 저결맞음 간섭무늬를 얻을 수 있음을 보였다. 한가지의 작은 단점은 높은 공간결맞음성으로 인해 먼지나 표면결함에 의한 회절 링(diffractive ring)이 측정결과에 관찰된다는 것이나 이는 위상정점을 이용함으로써 그 영향을 최소화 할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. J. Schweider, "White-light Fizeau interferometer," *Appl. Opt.*, Vol. 36, pp. 1433 - 1437, 1997.
2. C. Ai, "Multimode laser Fizeau interferometer for measuring the surface of a thin transparent plate," *Appl. Opt.*, Vol. 36, pp. 8135 - 8138, 1997.
3. C. Rulliere, *Femtosecond Laser Pulses* (Springer-Verlag, 1998).
4. J. Ye, "Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe," *Opt. Lett.*, Vol. 29, pp. 1153 - 1155, 2004.
5. S. S. C. Chim, G. S. Kino, "Three-dimensional image realization in interference microscopy," *Appl. Opt.*, Vol. 31, pp. 2550-2553, 1992
6. P. Sandoz, "An algorithm for profilometry by white-light phase shifting interferometry," *J. Mod. Opt.*, Vol. 43, pp. 1545-1554, 1996