

펨토초 레이저를 이용한 형상 측정용 비동일 광경로 저결맞음 간섭계

오정석[#], 김승우^{*}

Unequal-path Low-coherence Interferometry Using Femtosecond Pulse Lasers for Surface-profile Metrology

Jeong Seok Oh[#] and Seung-Woo Kim^{*}

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 unequal-path scanning interferometry, which is not feasible with white light. Second, the high spatial coherence of femtosecond pulse lasers enables large-sized optics to be tested in nonsymmetric configurations with relatively small-sized reference surfaces. These two advantages are verified experimentally using Fizeau and Twyman-Green type scanning interferometers.

Key Words: Femtosecond laser(펨토초 레이저), Low-coherence interferometry(저결맞음 간섭계), Scanning interferometry(주사간섭계), Envelope peak(가시도정점), Fringe peak(위상정점)

1. 서론

헬륨네온 레이저나 레이저 다이오드 등의 단색 레이저 광원은 위상천이법(phase-shifting method)¹과 함께 사용되어 높은 측정 정도를 보이기 때문에 트와이만-그린 간섭계(Twyman-Green interferometer)나 피조 간섭계(Fizeau interferometer)에 채택되어 컴퓨터 하드 디스크, 실리콘 웨이퍼 및 각종 광학부품의 표면형상 측정에 널리 사용되고 있다.

시간결맞음성(temporal coherence)은 광축 방향으로 떨어져 있는 두 광파의 위상 간의 상관도를 나

타내는 척도로서 광원의 분광대역폭(spectral bandwidth)과 관련되며 시간결맞음길이(temporal coherence length) Δl 은 다음과 같이 정의된다.²

$$\Delta l = \lambda_0^2 / \Delta \lambda_0 \quad (1)$$

여기서 λ_0 는 평균 파장, $\Delta \lambda_0$ 는 파장대역폭이다. 공간결맞음성(spatial coherence)은 광축에 대해 횡 방향으로 떨어져 있는 두 광파의 위상 간의 상관도를 나타내는 척도로서 파면의 위상이 얼마나 균일한 가를 나타내며 광원의 크기에 관련된다.

☞ 접수일: 2006년 3월 23일; 게재승인일: 2006년 7월 26일

교신저자: 한국기계연구원 지능기계연구센터

E-mail ojs6114@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7867

* 한국과학기술원 기계공학과

단색 레이저의 경우 광원의 우수한 시간 및 공간결맞음성으로 인해 측정대상물은 기준면에 대해 임의의 위치에 놓여질 수 있으며 비대칭적 간섭계 구성이 가능해 정렬 및 간섭계 구성이 매우 용이하다는 장점을 가지고 있다. 반면에, 광원의 우수한 시간결맞음성은 위상모호성(phase ambiguity)으로 인한 단차 측정에서의 높이 제한 및 LCD 유리와 같은 투명한 재질에서의 앞, 뒷면의 다중반사로 인한 간섭무늬의 중첩 등 단점 또한 유발하게 된다.

단색 광원의 단점을 해결할 수 있는 하나의 대안은 광원을 분광대역폭이 넓은 부분적 결맞음광(partially coherent light) 또는 백색광(white light)으로 대체하는 것이다. 이 경우, 광원의 짧은 시간결맞음길이에 의해 간섭무늬는 기준부와 측정부의 광경로 차가 거의 0 에 근접할 때만 나타나므로 단차나 투명 재질을 측정할 때의 문제점들을 해결할 수 있다.³ 이러한 장점으로 인해 백색광 간섭계는 현미경 광학계와 함께 사용되어 미세형상의 측정에 광범위하게 응용되고 있지만 대영역 형상 측정에 있어서는 그 활용이 크게 제한되고 있다.

그 첫 번째 이유는 짧은 시간결맞음길이에 기인하는 것으로, 피조 간섭계는 구조적으로 동일 광경로를 만들 수 없으므로 광경로지연⁴이나 멀티모드 동작⁵(multimode operation) 등의 특수한 방법이 동원되지 않으면 저결맞음 간섭무늬를 얻을 수 없다. 트와이만-그린 간섭계에서도 큰 곡률의 구면을 측정할 경우 기준면도 광분할기에 대해 멀리 떨어져 있어야 하는 문제를 초래하게 된다. 두 번째는, 주로 광원의 크기가 큰 할로겐 램프 등의 백열광원을 사용할 때 발생하는 문제로, 광원의 낮은 공간결맞음성으로 인해 피조 간섭계에서는 기준면과 측정면 사이의 갭 간격에 제약이 가해지고, 트와이만-그린 간섭계에서는 간섭계가 광분할기를 기준으로 대칭적으로 구성되어야 한다는 제한점을 가진다.^{1,2} 공간결맞음성을 개선하기 위해서는 편홀이나 단일모드 광섬유 등의 공간필터를 사용할 수 있으나 광효율을 크게 떨어뜨리는 단점을 가지고 있다.

이상의 관점에서 볼 때, 펨토초 레이저는 대영역 형상 측정용 저결맞음 간섭계를 구성하는데 있어 매우 적합한 광원이다. 첫 번째, 펨토초 레이저는 주기적인 낮은 시간결맞음성을 가지고 있어 기존의 백열광원으로는 불가능하였던 비동일 광경로 저결맞음 간섭계를 구성할 수 있다. 두 번째, 펨토초 레이저의 높은 공간결맞음성은 비대칭적인 간

섭계 구성을 가능하게 하여 상대적으로 작은 기준면을 가지고도 큰 면적의 형상을 측정할 수 있다.

본 연구에서는, 지금까지 주로 미세형상의 측정에만 사용되었던 저결맞음 간섭계의 응용범위를 대영역 형상 측정으로 확장하기 위하여 새로운 광원으로 펨토초 레이저를 제안하였으며, 펨토초 레이저의 주기적인 낮은 시간결맞음성 및 높은 공간결맞음성이 대영역 형상 측정에서 가지는 유용성 및 장점을 피조 및 트와이만-그린 형식의 주사간섭계를 통하여 실험적으로 검증하였다.

2. 펨토초 레이저의 특성

2.1 펨토초 레이저의 광대역 특성

펨토초 레이저의 시간 및 주파수영역에서의 특성을 Fig. 1 에 나타내었다.⁶

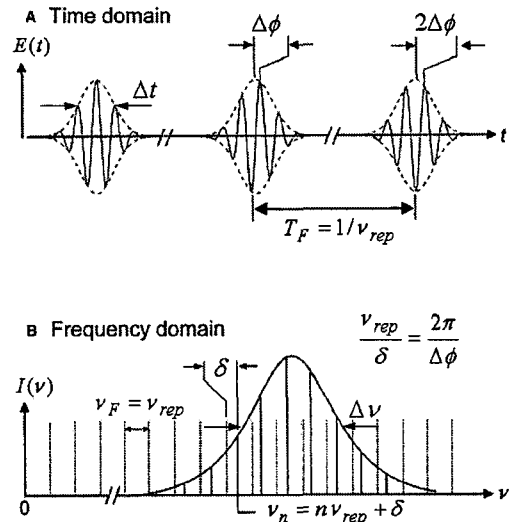


Fig. 1 Characteristics of femtosecond pulse lasers in time and frequency domain

시간영역에서 극초단 펄스의 형태를 가지는 펨토초 레이저는 주파수영역에서 등간격으로 분포하는 주파수 빔(frequency comb)들의 모드동기(mode lock)된 조합으로 나타낼 수 있다. 이때 모드간 간격 ν_F 는 펄스의 반복율(repetition rate) ν_{rep} 과 동일하며 펄스 간의 공간적인 간격은 펨토초 레이저의 공진기 길이 L_c 의 두 배가 된다. 시간

영역에서 펄스의 주기 T_F 는 펄스의 반복율 ν_{rep} 의 역수이므로 반복율과 공진기 길이의 관계를 광속 c 를 포함하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

또한 반폭(FWHM)으로 나타낸 주파수대역 $\Delta\nu$ 와 펄스폭 Δt 의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta t \cdot \Delta\nu \geq K \quad (3)$$

K 는 펄스의 형태에 따라 달라지며 가우시안 펄스의 경우 0.441에 해당하는 값을 가진다.⁷

식 (3)에서 알 수 있듯이 펄스폭과 주파수대역은 서로 반비례하는 관계를 가진다. 따라서, 중심 파장이 800 nm 이고 10 fs의 펄스폭을 가지는 레이저는 약 100 nm의 파장대역을 가지게 되며 이는 실질적으로 저결맞음 간섭계에 충분히 사용 가능한 넓은 대역이다.

2.2 펨토초 레이저의 주기적인 시간결맞음성

형상 측정에 있어서 펨토초 레이저의 또 다른 유용한 특성은 주기적인 낮은 시간결맞음성이다. Wiener-Khinchin theorem⁸에 의하면 점광원의 시간결맞음함수 $G(\tau)$ 는 광원의 세기분광밀도(power spectral density) $S(\nu)$ 와 푸리에 변환 쌍(Fourier transform pair)를 구성한다.

$$S(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\tau) \exp(-j2\pi\nu\tau) d\tau \quad (4)$$

여기서 τ 는 시간지연(time delay)이고 ν 는 주파수이다. 식 (4)에서 알 수 있듯이 광원의 스펙트럼이 주기적인 분포를 가지면 시간결맞음함수 역시 주기적인 분포를 가지게 된다.

이는 공간적으로는 Fig. 2와 같이 서로 다른 펄스가 만나서 간섭을 일으키는 것으로 설명할 수 있다. 2.1에서 언급했듯이 펄스 사이의 간격은 펨토초 레이저의 공진기 길이의 두 배인 $2L_c$ 이므로 피조 간섭계나 트와이만-그린 간섭계에서 기준부와 측정부 사이의 거리 차를 펨토초 레이저의 공진기 길이의 정수 배로 조절할 경우 비동일 광경로에서

도 저결맞음 간섭무늬를 얻을 수 있다.

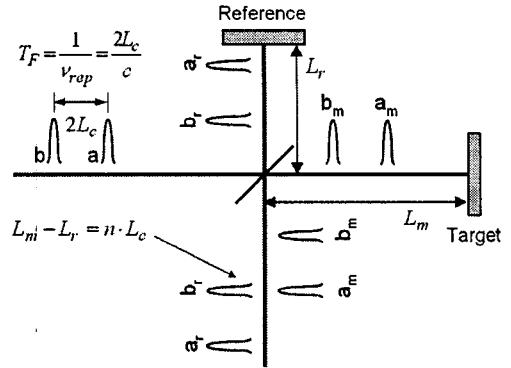


Fig. 2 Requirements for pulse-to-pulse interference

3. 펨토초 레이저를 이용한 비동일 광경로 저결맞음 간섭계

펨토초 레이저를 이용하여 대영역 형상 측정 에 응용할 수 있는 대표적인 두 가지 형태의 비동일 광경로 저결맞음 간섭계의 구성을 Fig. 3에 나타내었다.

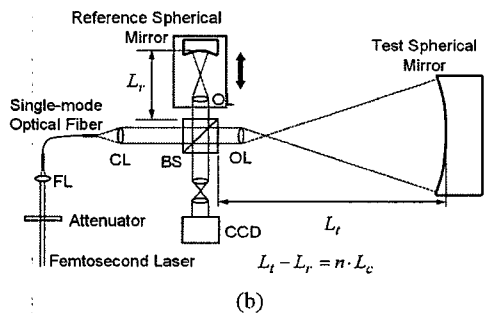
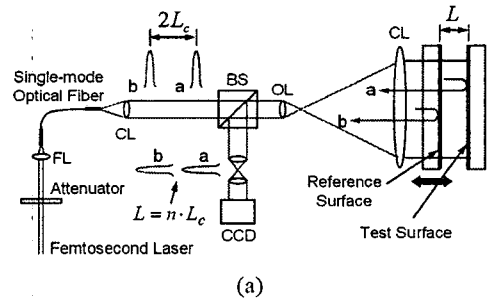


Fig. 3 Scanning interferometers that use femtosecond laser pulses: (a) unequal-path Fizeau configuration, (b) unequal-path nonsymmetric Twyman-Green configuration. L, surface gap; L_c , cavity length; BS, beam splitter; FL, focusing lens; CL, collimating lens; OL, objective lens; a, b, laser pulses

Fig. 3(a)는 서로 다른 펄스간의 간섭을 이용한 비동일 광경로 저결맞음 피조 간섭계의 구성으로, 펄초 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 선행펄스 a 와 후행펄스 b 를 겹치게 하여 저결맞음 간섭무늬를 얻을 수 있는 조건은 다음과 같다.

$$L = n \cdot L_c \tag{5}$$

L 은 기준면과 측정면 사이의 갭이다.

Fig. 3(b)는 구면 측정용 비동일 광경로 비대칭 저결맞음 트와이만-그린 간섭계의 구성을 보여 준다. 비대칭적인 구성이 어려운 백열광원에 비하여 펄초 레이저는 주기적인 시간결맞음성 및 우수한 공간결맞음성으로 인하여 기준구면의 크기를 작게 하면서 광분할기로부터의 거리 L_c 을 짧게 할 수 있는 장점을 가진다.

Fig. 4 는 본 연구에 사용된 펄초 레이저의 펄스폭과 분광특성을 보여 준다. 펄초 레이저는 (FEMTOLASERS, Inc., FEMTOSOURCE Scientific PRO) 10.5 fs 의 펄스폭에 797 nm 의 중심파장을 기준으로 111 nm 정도의 파장대역을 가지고 있다. 펄초 레이저의 반복율은 75 MHz 로 공진기 길이는 약 2 m 이다. 넓은 파장대역으로 인해 시간결맞음 길이가 매우 짧기 때문에 기준면과 측정면의 상대 거리를 공진기 길이의 정수 배로 한번에 조정하여 간섭무늬를 얻는 것은 매우 어렵다. 이 문제를 해결하기 위하여 헬륨네온 레이저를 이용하여 간섭 무늬를 일단 형성하고 반축폭(FWHM)이 1.5 nm 인 간섭필터를 사용하여 측정면의 광축 방향 위치를 어느 정도 정렬한 후 미세 정렬을 수행하였다.

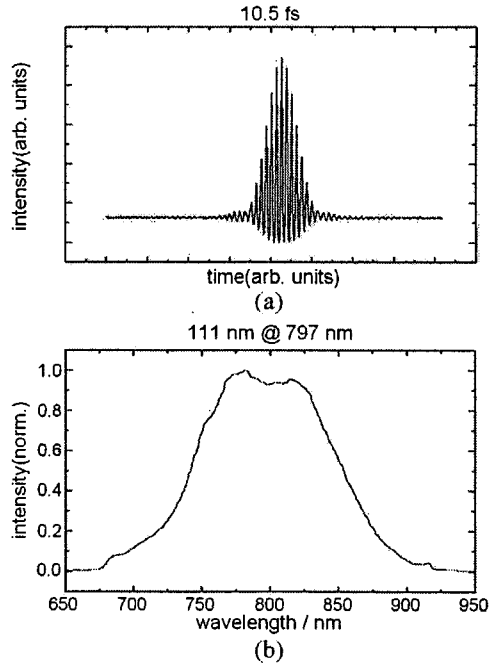


Fig. 4 Characteristics of used femtosecond laser: (a) interferometric autocorrelation, (b) spectrum

4. 실험결과 및 분석

4.1 비동일 광경로 저결맞음 간섭계의 구현

Fig. 5 는 Fig. 3(a)의 구성을 이용하여 광학제질인 BK7 으로 제작된 투명 평행판을 측정하였을 때, CCD 중심 인근의 임의의 화소에서 얻은 기준면의 주사거리에 따른 간섭신호를 보여 준다.

피조 간섭계의 기준면을 주사하기 위한 스테이지로는 정전용량형 센서(capacitive sensor)에 의해 귀환제어 되는 PI 사의 3 축 PZT 스테이지인 P-517.3CL 모델을 사용하였다. 동일 광경로 조건을 필요로 하는 백열광원의 경우 피조 간섭계에 적용하는 것이 매우 힘든 것에 비해 펄초 레이저의 경우 측정면이 기준면에 비해 2 m 떨어진 비동일 광경로 조건에서도 깨끗한 저결맞음 간섭신호를 손쉽게 획득할 수 있음을 알 수 있다. 기준면을 주사함에 따른 기준광의 광경로 변화는 주사거리의 두 배에 해당함을 감안하면, 간섭신호의 정현 변화성분의 주기는 약 400 nm 로 펄초 레이저의 중심파장의 절반과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 간섭신호의 가시도를 보면 주 로브(main

lobe)를 기준으로 약 15 μm 의 광경로 변화에 대해 간섭신호를 형성하고 있음을 알 수 있다.

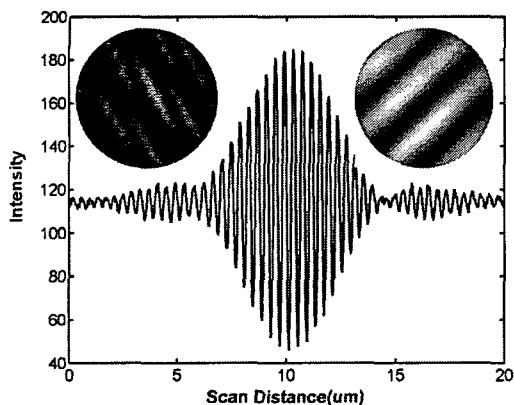


Fig. 5 Typical temporal interferogram sampled with scanning from a single pixel of the CCD camera: Left-top inset, spatial interferogram capture by use of He-Ne laser; Right-top inset, spatial interferogram capture by use of femtosecond laser

그림의 우측 상단은 가시도가 최대인 주사위치에서 순간적으로 얻은 전체 간섭무늬를 보여 준다. 측정면은 투명 평행판의 앞면이었으며 뒷면에서 반사된 광은 식 (5)의 간섭조건을 만족시키지 않으므로 그 영향이 배제된 깨끗한 간섭무늬를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림의 좌측 상단은 동일한 간섭계 구성에서 광원만 펨토초 레이저에서 헬륨 네온 레이저로 교체했을 때 얻은 간섭무늬로 광원의 긴 시간결맞음길이로 인해 기준면 및 투명 평행판의 앞면과 뒷면에서 반사된 광이 서로 간섭을 일으켜 복잡한 간섭무늬를 형성하는 것을 알 수 있다. 일반적으로는 이로부터 원하는 면의 형상정보를 추출하는 것이 거의 불가능하다.

저결맞음 간섭계 구성에서 가장 중요한 고려사항 중의 하나는 기준부와 측정부의 분산 불일치 (dispersion mismatch)로 인한 간섭신호의 왜곡이다.¹⁰ Fig. 3(a)의 구성에서는 기준면과 측정면 사이에 공기만 존재하므로 특별히 분산의 불일치는 발생하지 않는다.

4.2 비대칭 저결맞음 간섭계 구성에 있어서 공간결맞음성의 영향

비동일 광경로 저결맞음 간섭계를 구성함에 있어서 기준부와 측정부의 비대칭성이 대부분 발생하므로 좋은 가시도의 간섭무늬를 얻기 위해서는 우수한 공간결맞음성이 필요하다.

비대칭 간섭계에서 공간결맞음성이 미치는 영향을 비교, 분석하기 위해 Fig. 3(b)에 나타낸 트와이만-그린 간섭계의 구성을 이용하였다. 공간결맞음성이 낮은 할로젠 램프와의 비교를 위해 동일 광경로($L_1=L_2$)로 구성하였으며 기준면과 측정면의 곡률의 차이를 이용하여 간섭계에 비대칭성을 부여하였다. 측정 구면거울은 곡률반경 200 mm, 직경 50 mm, 기준 구면거울은 곡률 25 mm, 직경 25 mm의 알루미늄 거울이 사용되었으며 기준부와 측정부의 분산을 일치시키기 위하여 동일한 대물렌즈(Mitutoyo, M Plan NIR 10X)를 사용하였다.

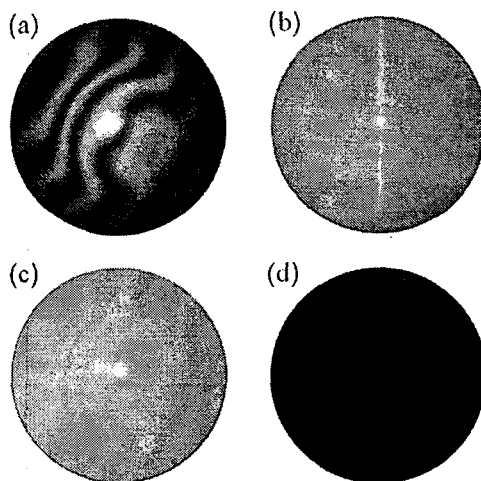


Fig. 6 Comparison of spatial interferogram obtained from different sources for a spherical mirror: (a) femtosecond laser, and halogen lamps filtered by (b) a multimode fiber of 700 μm core diameter, (c) a multimode fiber of 200 μm core diameter, and (d) a single-mode fiber of 3 μm core diameter

Fig. 6(a)는 펨토초 레이저를 단일모드 광섬유에 입사시켜 얻은 간섭 무늬이다. 펨토초 레이저를 이용하여 얻은 간섭무늬의 경우 우수한 공간결맞음성과 짧은 시간결맞음길이로 인해 기생간섭무늬가 배제된 명확한 간섭무늬를 얻을 수 있음을 알

수 있다. 이에 반해, 할로젠 램프의 광을 700 μm 의 코어 직경을 가진 다중모드 광섬유에 입사시켰을 경우(Fig. 6(b))에는 간섭무늬를 얻을 수 없었으며, 200 μm 의 코어직경을 가진 다중모드 광섬유에 입사시켰을 경우(Fig. 6(c))에는 가시도가 극히 나쁜 결과를 보였다. Fig. 6(d)는 할로젠 램프의 광을 단일모드 광섬유에 입사시켰을 때의 결과로 극도로 나쁜 광효율로 인해 충분한 광량을 얻을 수 없었다.

4.3 정점 검출 알고리즘의 영향

펄스 레이저를 이용한 비동일 광경로 저결맞음 간섭계에 있어서 고려되어야 할 세 번째 요소는 획득된 간섭신호로부터 정점을 계산하는 방법에 관한 것이다. 정점 검출 알고리즘에 관해서는 지난 20 여 년간 주로 백색광 주사간섭계에서 매우 많은 연구가 이루어져 왔으며 대표적으로 Fig. 7 에 나타낸 바와 같이 가시도정점¹¹⁻¹³ (envelope peak)을 검출하는 방법과 위상정점¹⁴⁻¹⁶ (fringe peak)을 검출하는 방법으로 분류할 수 있다. 가시도정점은 군속도(group velocity)와 관련되며, 위상정점은 위상속도(phase velocity) 및 반사 시 위상변화와 관련되어 두 정점은 일반적으로 일치하지 않고 옅셋을 가지게 된다.

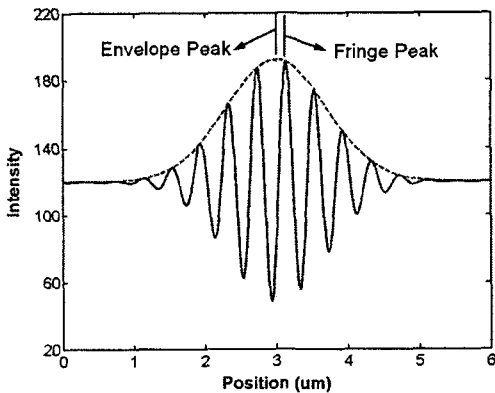


Fig. 7 Envelope peak vs. fringe peak

정점 검출에 있어 본 연구는 새로운 방법을 제안하기 보다는 투명 평행판을 이용하여 얻은 간섭신호에 기존의 두 방법을 적용하여 그 영향을 비교하였다.

Fig. 8(a)는 가시도정점 검출법을 이용해 계산된 형상 및 단면 프로파일(profile)을, Fig. 8(b)는 위상정점 검출법을 이용해 계산된 프로파일을 각각 보여 준다. 결과에서 확연히 드러나듯이, 위상정점을 이용한 결과는 평균제곱근(root mean square) 3.1 nm의 상당히 부드러운 결과를 보였으나 가시도정점을 이용한 결과는 평균제곱근 13.2 nm로 요동이 심한 결과를 보였다. 두 결과의 차이는 간섭신호에서 주사거리에 따른 가시도의 변화보다는 위상의 변화가 급격한 것에 따른 민감도의 차이로 설명될 수 있으며 백색광 주사간섭계에서도 비슷하게 관찰되는 현상이다.¹⁶

또 하나의 주목할 만한 점은 가시도정점을 검출한 Fig. 8(a)에서 뚜렷이 관찰되는 링 형태의 패턴으로 이는 광학부품이나 측정대상물에 존재하는 먼지나 표면결함에 의한 회절의 영향에 의한 것이며 펄스 레이저의 높은 공간결맞음성에 기인한다.¹⁷ 위상정점을 검출한 경우에도 링 패턴은 관찰되나 그 크기는 미미한 수준이다.

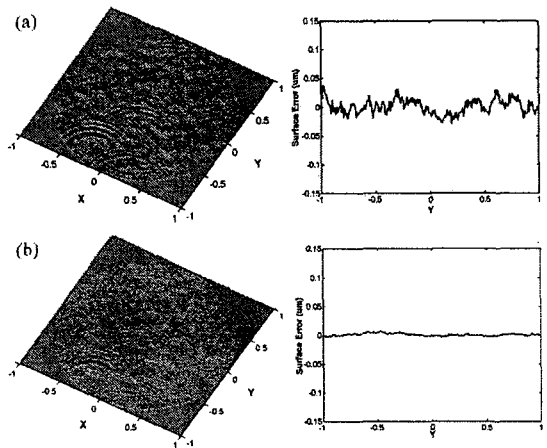


Fig. 8 Measured surface maps with sectional profiles obtained by (a) envelope peak detection, and (b) fringe peak detection. The measured object is the front surface of well-polished glass

4.4 펄스 레이저의 반복율에 의한 영향

Fig. 1 및 식 (2)에서 알 수 있듯이 펄스 간의 간격은 반복율에 의해 결정되며 반복율은 공진기의 길이에 의해 결정되므로 공진기 길이가 변할

경우 펄스 간의 간격은 달라지게 된다. 예를 들어, 공진기 길이가 2 m 이고 반복율이 75 MHz 일 경우 1 Hz 의 반복율 변화는 두 개의 연속한 펄스에서 약 54 nm 의 간격 변화를 초래한다. 서로 다른 펄스 간의 간섭을 이용하는 비동일 광경로 저격맞춤 간섭계에서는 기준면과 측정면의 상대 거리가 일정하더라도 반복율이 변하면 간섭무늬가 변하게 되므로 반복율의 안정화가 필요하다.¹⁸ 본 연구에서 사용된 펨토초 레이저는 안정화 장치가 없는 모델로 실험실의 환경변화에 따라 공진기 길이가 변하게 된다. 가장 큰 요인은 온도 변화에 의한 열 팽창의 영향으로 Fig. 9 에 온도 변화에 따른 반복율의 변화를 백금저항온도계와 광검출기를 이용하여 6 시간 동안 측정한 결과를 나타내었다.

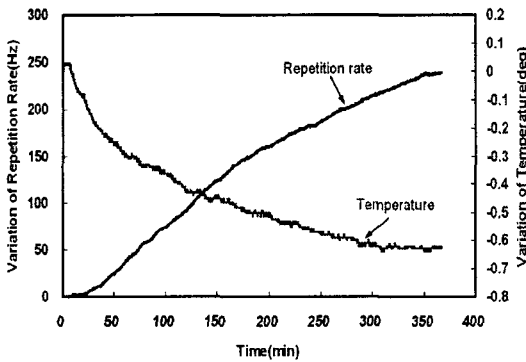


Fig. 9 Relation between temperature and repetition rate

온도 제어는 이루어지지 않은 상태에서 온도는 0.63 °C 감소하였고 반복율은 239 Hz 상승하였다. 공진기 길이 변화는 온도 변화와는 비례하고 반복율 변화와는 반비례하므로 온도 변화와 반복율 변화는 서로 반비례해야 하며 측정결과가 이러한 경향을 잘 보여 주고 있다.

반복율의 변화와 간섭신호의 변화 간의 관계를 관찰하기 위해 반복율과 동시에 CCD 입자의 화소에서의 광강도 변화를 동시에 관찰하였다. 측정위치는 Fig. 10 에 나타낸 것처럼 가시도가 최대인 지점에서 평균 광강도를 가지는 위치로 고정하였으며 비교실험에서의 가시도의 차이에 의한 영향을 없애기 위해 강도 변화를 최대 광강도차 ΔI_{max} 로 나누어 정규화한 값을 사용하였다.

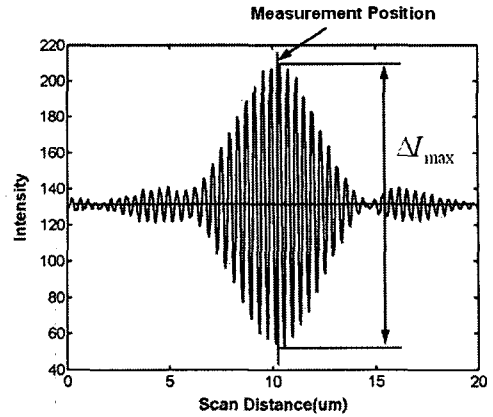


Fig. 10 Intensity normalization

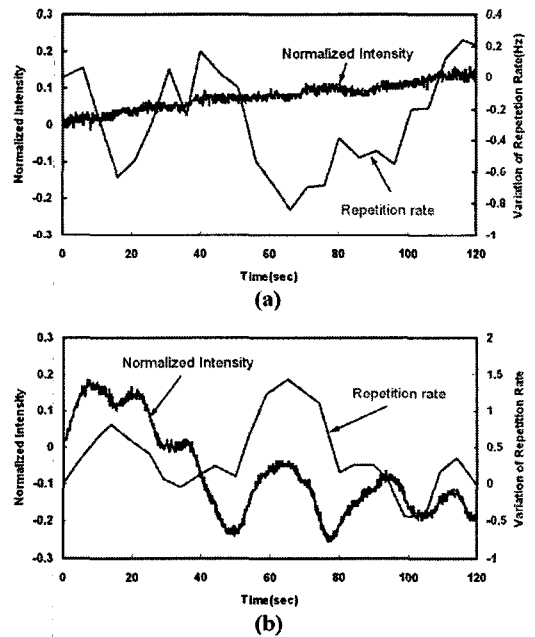


Fig. 11 Effect of the variation of repetition rate on the drift of interference signal: (a) equal-path Twyman-Green interferometer (b) Fizeau interferometer

Fig. 11(a)는 동일 광경로 트와이만-그린 간섭계에서 얻은 정규화된 광강도의 변화와 반복율의 변화를 보여 준다. 예상할 수 있듯이 같은 펄스끼리

의 간섭에 있어서는 강도 변화가 반복율의 변화에 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

Fig. 11(b)는 피조 간섭계에서 얻은 정규화된 광강도의 변화와 반복율의 변화를 나타낸 것이다. 연속한 두 펄스의 간섭에 있어서는 강도 변화와 반복율의 변화가 경향이 일치함을 알 수 있다. 그림에 있어 두 변화의 기울기가 다른 것은 피조 간섭계의 기준면과 측정면 사이의 상대 거리가 온도 변화에 의해 달라지는 것에 기인한다.

저결맞음 간섭계에서 측정시간은 수초 이내로 길지 않으나 비동일 광경로 저결맞음 간섭계에서는 반복율의 변화가 측정에 영향을 주게 되므로 가급적 반복율을 안정화하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

본 연구에서는 공진기 길이 2 m의 펨토초 레이저를 사용했으나 실제적인 적용을 위해서는 공진기 길이가 짧은 고반복율의 펨토초 레이저를 사용하는 것이 바람직하다. 예를 들어, 현재 2 GHz의 반복율에 75 mm의 공진기 길이를 갖는 펨토초 레이저가 보고되고 있으며¹⁹, 이 경우 피조 겹을 75 mm의 정수 배로 유지하면 간섭무늬를 얻을 수 있으므로 현실적으로 사용하는데 큰 무리가 없다. 또한, 온도에 의한 공진기의 길이 변화도 줄어들게 되므로 안정화의 필요성 역시 감소할 것이다.

5. 결론

펨토초 레이저는 광대역 광원으로 우수한 공간결맞음성 및 주기적인 낮은 시간결맞음성을 가지고 있어 비동일 광경로 저결맞음 간섭계를 통한 대영역 형상 측정에 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 링이 측정결과에 관찰된다는 것이나 이는 위상정점을 이용함으로써 그 영향을 최소화 할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업의

지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Malacara, D., "Optical Shop Testing 2nd Edition," John Wiley & Sons, 1992.
2. Born, M. and Wolf, E., "Principles of Optics 7th Edition," Cambridge University Press, 1999.
3. Kim, S. W., "Technological trends for precision optical metrology," Journal of the KSPE, Vol. 17, No. 6, pp. 7 - 16, 2000.
4. Schweider, J., "White-light Fizeau interferometer," Appl. Opt., Vol. 36, No. 7, pp. 1433 - 1437, 1997.
5. Ai, C., "Multimode laser Fizeau interferometer for measuring the surface of a thin transparent plate," Appl. Opt., Vol. 36, No. 31, pp. 8135 - 8138, 1997.
6. Jones, D. J., Diddams, S. A., Ranka, J. K., Stentz, A., Windeler, R. S., Hall, J. L. and Cundiff, S. T., "Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis," Science, Vol. 288, pp. 635 - 639, 2000.
7. Rulliere, C., "Femtosecond Laser Pulses," Springer-Verlag, 1998.
8. Saleh, B. E. A. and Teich, M. C., "Fundamentals of Photonics," John Wiley & Sons, 1991.
9. FEMTOLASERS, Users manual for FEMTOSOURCE Scientific PRO.
10. Pavlicek, P. and Soubusta, J., "Measurement of the influence of dispersion on white-light interferometry," Appl. Opt., Vol. 43, No. 4, pp. 766 - 770, 2004.
11. Ai, C. and Novak, C. C., "Centroid approach for estimating modulation peak in broad-bandwidth interferometry," U.S. patent 6633715.
12. Kino, G. S. and Chim, S. S. C., "Mirau correlation microscope," Appl. Opt., Vol. 29, No. 26, pp. 3775 - 3783, 1990.
13. Chim, S. S. C. and Kino, G. S., "Three-dimensional image realization in interference microscopy," Appl. Opt., Vol. 31, No. 4, pp. 2550 - 2553, 1992.
14. Larkin, K. G., "Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry," J. Opt. Soc. Am. A., Vol. 13, No. 4, pp. 832 - 843, 1996.
15. Sandoz, P., "An algorithm for profilometry by white-

- light phase-shifting interferometry," J. Mod. Opt., Vol. 43, No.8, pp. 1545 - 1554, 1996.
16. Harasaki, A., Schmit, J. and Wyant, J. C., "Improved vertical scanning interferometry," Appl. Opt., Vol. 39, No. 13, pp. 2107 - 2115, 2000.
 17. Harasaki, A. and Wyant, J. C., "Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry," Appl. Opt., Vol. 39, No. 13, pp. 2101 - 2106, 2000.
 18. Ye, J., "Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe," Opt. Lett., Vol. 29, No. 10, pp. 1153 - 1155, 2004.
 19. Bartels, A., Dekorsy, T. and Kurz, H., "Femtosecond Ti:sapphire ring laser with a 2-GHz repetition rate and its application in time-resolved spectroscopy," Opt. Lett., Vol. 24, No. 14, pp. 996 - 998, 1999.