



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2016년 2월

석사학위논문

분산간섭계 원리를 이용한 다 채널 광학 갭 센서에 관한 연구

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

김 병 권

분산간섭계 원리를 이용한 다 채널 광학 갭 센서에 관한 연구

Multi-channel optical proximity sensor based on
spectrally-resolved interferometry

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

김 병 권

분산간섭계 원리를 이용한 다 채널 광학 갭 센서에 관한 연구

지도교수 주 기 남

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

김 병 권

김 병 권의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 안 태 정 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 현 수 (인)

위 원 조선대학교 교수 주 기 남 (인)

2015년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서론	1
제1절 연구 배경	1
제2절 연구 현황	3
(1) 비행시간법 기반 센서	3
(2) 광삼각법 기반 센서	3
(3) 공간섭계 기반 센서	4
제3절 연구 목표 및 내용	6
제2장 분산간섭계 원리를 이용한 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서	7
제1절 분산간섭계의 원리	7
(1) 분산간섭계의 기본 원리	7
(2) 분산간섭계의 측정 영역	12
(3) 분산간섭계의 분해능	17
제2절 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서	18
(1) 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서	18
(2) 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서의 측정 영역	20
(3) 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서의 분해능 및 안정도	20
제3장 실험 결과 및 분석	22
제1절 단일 채널 분산간섭계 실험	22
제2절 다 채널 거리 측정 실험	28
제3절 다 채널 광학 근접 거리 센서의 제품화	36

(1) 하드웨어 구성	36
(2) 소프트웨어 구성	39
(3) 시제품의 성능 평가	40
제4장 고찰 및 논의	42
제5장 결론	46
[참고문헌]	57
[감사의 글]	50

그림 목차

Fig. 1-1 노광 장비 및 내부의 구동부	1
Fig. 2-1 분산간섭계의 광학 구성	8
Fig. 2-2 (a) 분산간섭계의 일반적인 간섭신호, (b) (a)의 푸리에 변환 결과, (c) 광 주파수에 따른 위상, (d) (c)의 Unwrapping 결과	11
Fig. 2-3 (a) 가우시안 분포의 광원, (b) (a)의 푸리에 변환 결과	13
Fig. 2-4 측정 거리가 최소 측정 영역 이하 일 때의 푸리에 변환 결과	14
Fig. 2-5 (a) 분광기에서 샘플링 되는 간섭 신호, (b) 샘플링 된 간섭 신호에 의해 발생하는 푸리에 영역에서의 점두 크기 변화	16
Fig. 2-6 (a) 다 채널 광학식 정밀 근접 거리 센서 개략도, (b) 측정 프로브의 광학 구성	18
Fig. 2-7 다 채널 정밀 근접 거리 센서에서 측정되는 간섭 신호	19
Fig. 3-1 기초 실험을 위한 단일 채널 광학 정밀 근접 거리 센서 시스템	23
Fig. 3-2 측정 시스템에 사용된 SLD(1005S)와 스펙트럼	24
Fig. 3-3 (a) 프로브 조립 전 (b) 조립 후	24
Fig. 3-4 측정 시스템에 사용된 NIR 분광기와 광학 구성도	24
Fig. 3-5 (a) 분산간섭계의 파장별 간섭 신호, (b) (a)를 광주파수 대역으로 변환한 결과, (c) (b) 푸리에 변환한 결과, (d) 광주파수별 위상, (e) (d) Unwrapping 결과	26
Fig. 3-6 단일 채널 분산간섭계를 이용한 거리 측정 결과	27
Fig. 3-7 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서의 시스템 구성	28
Fig. 3-8 SLD1550S-A2의 광원 파장 분포	29

Fig. 3-9 다 채널 광학 근접 거리 센서 실험을 위한 시스템 구성과, 프로브 구성 29

Fig. 3-10 NIR 분광기 모듈에서 각 채널별로 동시 측정 된 프로브 간섭 신호 30

Fig. 3-11 각 측정 채널별 분석과정, (a) 간섭 신호의 푸리에 변환 결과, (b) 광 주파수별 위상 32

Fig. 3-12 측정 채널별 거리 측정 결과 및 측정 영역 확인 33

Fig. 3-13 다 채널 광학적 정밀 근접 거리 측정 센서의 채널별 반복능 평가 34

Fig. 3-14 (a) 15 분 동안 고정 된 거리 측정 결과, (b) (a)의 Allan deviation 값 35

Fig. 3-15 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서 시스템 시제품 완성 모습 36

Fig. 3-16 시제품 제작을 위한 케이스 도면 37

Fig. 3-17 (a) Matlab 소프트웨어로 구현된 측정 알고리즘과 (b) Matlab GUI 기반 측정 소프트웨어 39

Fig. 4-1 설계, 제작된 1차 광학 프로브 구성도와 실제 구성된 모습 43

Fig. 4-2 설계, 제작된 2차 광학 프로브 구성도와 실제 구성된 모습 43

표 목차

Table. 1 단일 채널 실험을 위한 광학 구성 부품의 사양 23

Table. 2 단일 채널 실험을 위한 광학 구성 부품의 사양 28

ABSTRACT

Multi-channel optical proximity sensor based on spectrally-resolved interferometry

By Byeong Kwon Kim

Advisor : Prof. Ki-Nam Joo, Ph.D.

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

According to the demands of precision industry, distance or gap measurements have been important because of the assembly and alignment of several components. Moreover, precise moving stage needs to be calibrated by measuring some motion errors. Electrical sensors have been widely used to measure very small gaps between the probe and the target precisely. However, they have some practical limitations caused by their fundamental operation, which the electricity should be applied in the gap. The material of the target is limited as conductive and the working distance is in the range of a few hundreds of micrometers. In order to overcome these limitations, several optical sensors have been developed by using the optical triangulation technique and time of flight method but their resolution cannot reach the expected region. On the other hand, optical interferometry is very attractive tool to measure distances precisely. Especially, spectrally-resolved interferometry (SRI) is suitable for the optical gap sensor to replace the electrical sensors because it can measure distances without any mechanical

and electrical scanning parts and it is free for well-known ambiguity problem. Moreover, the measurement channel can be extended by using a spectral band-pass filter because a broadband light source is used in SRI.

The main advantage of this sensor is that it can measure several distances at once with a single light source and a single spectrometer because the spectrometer can detect the whole spectral interferogram. Opposed to other interferometric sensors, which needs detectors and electronics as much as the number of measurement channels, the proposed sensor is convenient to extend the measurement channels. Moreover, the measurement probe can be miniaturized by using small fiber optic components.

In this thesis, the whole system was constructed with commercial optic components for feasibility test. A SLD which has 1550 nm center wavelength and 90 nm bandwidth was used as an optical source. CWDM has 4 channels which have 1530, 1550, 1570, 1590 nm center wavelength with 20 nm bandwidth to deliver the light to measurement probes. Each prototype measurement probe consists of a GRIN lens collimator and a beam splitter and a kinematic mount as used to align the beam splitter and collimator lens. The spectral interference signal was detected by a NIR spectrometer and analyzed by Matlab software.

In order to confirm the measuring range of the system, the stage was moved in the range of 2.5 mm with 5 μm step size and the distances were measured by 4 probes. As the measurement results of 4 probes, it was confirmed that each probe can measure the distance from 200 μm to 1.4 mm successfully. In addition, the linearity were checked with the open-loop stage positions and they were within 0.6%. For the measurement stability, the target was put on the fixed position and the distances were continuously measured. For the short term test, the standard deviation of 20 consecutive measurement results and the repeatability was less than 20 nm. These instability are attributed to the narrow spectral bandwidth of each probe,

which can limit the number of the available data and it can lower the measurement stability. Moreover, the computation errors during the curve fitting and windowing procedure in the algorithm may be involved in the measurement results as known the poor stabilities of channel 1 and 4. For the relatively long term, one of the probes was further explored to measure the fixed distances for 15 minutes and the stability was less than 30 nm.

Key words : Fiber optic sensor, Multi-channel sensor, Proximity sensor, Spectrally-resolved interferometry, Coarse wavelength division multiplexer(CWDM)

제1장 서론

제1절 연구 배경

오늘날 정밀 CNC (Computerized Numerical Control) 가공기 및 노광기 (Lithography machine), 고속 가공기 (High-speed manufacturing machine) 등과 같은 초정밀 가공기 및 CMM (Coordinate Measuring Machine)과 같은 초정밀 측정기는 고집적화 된 반도체 및 고해상도 디스플레이 분야 제품의 제조 공정상에서 필수불가결한 요소로 자리매김하였다. 특히, 고성능 스마트폰 (Smart phone)이나 태블릿 (Tablet) PC 등의 개발 및 상용화는 주요 핵심 부품인 CPU와 반도체 메모리, 디스플레이 패널 등의 수요를 급증시키고 있으며, 이에 따라 첨단 부품들의 생산성이 강조되고 있다. 그래서 첨단 제품 및 부품의 생산성 증대를 위해 제조 공정에서 이용되는 초정밀 가공/측정기의 정밀도는 더욱 중요해지고 있다.

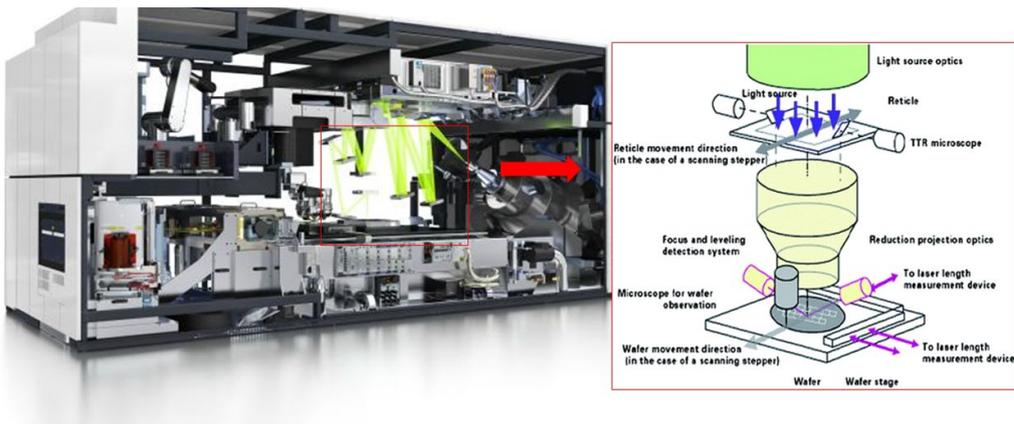


Fig. 1-1. 노광 장비 및 내부의 구동부 [1, 2]

일반적으로 초정밀 가공/측정기의 정밀도는 내부에 구성되어 있는 구동부 (Moving stage)에 의해 결정되며, 각 구동부의 위치 결정 정밀도가 결국 장

비의 전체 정밀도를 결정한다. 예를 들어, 노광기의 경우 Fig. 1-1과 같이 내부에 마스크 (Mask)와 웨이퍼 (Wafer)의 정렬, 광원의 정렬 등을 위해 수많은 구동부를 가지고 있고, 또한 노광기의 정밀도 향상을 위해 각 구동부에서는 구동 오차를 최소화하여야 한다. 이때 초정밀 가공/측정기에서 각각의 구동부가 직선 운동 (Z축 구동)을 한다고 가정할 경우, 이러한 구동부는 구동하는 축을 제외한 5개의 축에 해당하는 구동 오차 (X straightness, Y straightness, yaw, pitch, roll error)를 가지고 있으며 [3], 정밀한 직선 운동을 위해서는 5개의 구동 오차를 모두 측정, 보상해 주어야 한다. 그리고 구동 오차들을 측정하기 위해 사용되는 센서들은 비교적 작은 측정 영역에서 높은 분해능 및 정밀도를 가지고 있어야 하며 많은 양의 오차를 측정하기 위한 다수의 프로브를 필요로 한다.

현재 첨단 정밀 산업계에서는 이러한 정밀 측정 센서의 필요성에 따라 측정 분해능이 높고 안정성이 우수한 정전 용량 센서 (Capacitive sensor)가 널리 사용되어지고 있다. 정전 용량 센서는 mm이하의 영역에서 거리를 측정하는 정밀 근접 센서로 프로브와 대상물체 사이에서의 전기적 변위 (Electrical displacement)를 기반으로 근접 영역에서의 정확한 거리 측정이 가능하다 [4]. 그러나 이러한 정전 용량 센서는 측정 대상물의 물질이 전도성을 가져야 하는 한계를 가지고 있기 때문에 측정하고자 하는 대상물이 부도체일 경우 측정이 불확실하고, 주변 환경의 변화에 따른 영향으로 인해 정확한 측정을 수행하는데 있어서 어려움이 있다. 한편 또 다른 전자식 근접 거리 센서 중의 하나인 LVDT (Linear variable differential transformer)는 코어 (Core)의 움직임에 따라 전기적 신호를 생성하여 코일의 근접 정도에 따른 전압 차이로 변위 측정을 한다 [5]. 그러나 리드선의 길이 사용에 따라 교류로 인한 잡음 (Noise)이 측정 결과에 영향을 미치기 때문에 정밀도가 낮은 한계가 있다.

한편, 전자식 센서와는 달리 광학식 센서 (Optical sensor)는 대상 물체에 대한 비접촉식, 비파괴 측정 방법으로 측정 대상의 종류와 상관없이 측정할 수 있는 장점이 있어서 정밀 측정 센서로 매우 적합하다. 또한, 높은 분해능

으로 변위 및 거리를 측정할 수 있기 때문에 현재 산업계에서 널리 사용되고 있으나, 다 채널 측정을 위해서는 전체 시스템이 비교적 복잡해지는 동시에 다수의 광 검출기 및 광원이 필요하다는 한계가 있다. 그래서 효율적이고 다 채널 측정이 가능한 광학식 정밀 근접 거리 측정 센서에 대한 연구 및 개발이 필요한 실정이다.

제2절 연구현황

일반적으로 광학식 거리 센서는 측정 원리에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 비행시간법 (Time of flight)기반 센서
- 광삼각법 (Optical triangulation)기반 센서
- 광간섭계 (Optical interferometer)기반 센서

(1) 비행시간법 기반 센서

비행시간법은 광속 기반으로 거리를 측정하는 방법으로, 광이 광원에서 출발한 시간과 광 검출기에 도달하는 시간을 측정하여 그 시간 차이와 광속의 곱으로 거리를 산출한다. 그러나 일반적인 비행시간법 센서는 측정 원리상 짧은 거리보다는 긴 거리를 측정하는 용도로 널리 활용되고 있고, 시간 측정의 정밀도 및 정확성으로 인해 측정 분해능이 비교적 낮다 [6]. 또한 산업계에서 널리 사용되고 있는 비행시간법은 광통신 분야에서 활용되고 있는 광학 시간 반사 센서 (Optical Time Domain Reflectometry, OTDR)로 광섬유에서 발생하는 손실을 측정하기 위한 용도 및 손실이 발생하는 용도로 사용되고 있어 [7] 일반적인 높은 분해능의 정밀 거리 측정에 한계가 있다.

(2) 광삼각법 기반 센서

광삼각법은 광이 균일한 매질 내에서 직선으로 진행하는 특징을 이용하여

측정 대상체의 위치 변화량을 광 검출기 배열 (Photodetector array)에서 맺히는 광의 위치 변화를 통해 기하학적으로 계산한다. 비교적 간단한 구성과 원리를 통해 변위 및 거리를 측정하기 때문에 원자 현미경 (Atomic force microscopy) [8]과 패턴 조사 현미경 (Fringe projection) [9]에 널리 사용되고 있다. 그러나 광삼각법 기반 센서는 다 채널로 활용하기 위해서 다수의 광 검출기 배열이 필요하며, 수직 입사 방향으로 거리를 측정하지 못하는 단점으로 인해 정밀 근접 거리 센서로 이용하기 어렵다.

(3) 광간섭계 기반 센서

광학 간섭계는 수 nm의 분해능으로 변위 및 거리 측정이 가능하기 때문에, 산업계에서 거리 및 형상 측정 기술로 개발, 응용되어 왔다. 더욱이 반도체 산업이나 TFT LCD 산업과 같은 초정밀 위치 결정 기술을 필요로 하는 분야에서, 거리 측정용 광학 간섭계는 측정뿐만 아니라 정밀 구동부의 제어를 위한 센서로 널리 사용되고 있다 [10]. 광학 간섭계는 응용 측면에서 변위 간섭계 (Displacement interferometer)와 거리 간섭계 (Distance interferometer)로 나눌 수 있으며, 변위 간섭계는 측정 대상의 위치 변화량만을 측정할 수 있기 때문에 근접 거리 센서로 활용하기에는 무리가 따른다. 이에 반해 거리 간섭계는 측정 대상체가 고정되어 있는 경우에도 거리를 측정할 수 있는 특징이 있어 근접 거리 센서로 활용하기에 용이하다. 이러한 거리 간섭계는 측정 원리에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다 [11].

- 등가 파장 간섭계 (Synthetic wavelength interferometry)
- 주파수 변조 연속파 간섭계
(Frequency Modulation Continuous Wave interferometry)
- 다 파장 간섭계 (Multi-wavelength interferometry)
- 백색광 주사 간섭계 (White light scanning interferometry)
- 분산간섭계 (Spectrally-resolved interferometry)

등가 파장 간섭계는 광강도 변조 (Intensity modulation) [12]나 주파수 변조 (Frequency modulation) [13], 다중 모드 레이저 (multi-mode laser) [14] 등을 이용하여 라디오파 (Radio-frequency) 영역대의 주파수를 생성하고, 그에 대한 등가 파장의 위상차로 거리를 측정한다. 주파수 변조 연속파 간섭계는 주파수 변조가 가능한 광원을 이용하여 측정 거리에 해당하는 주파수 변화량을 측정하여 거리를 측정한다 [15]. 두 방법 모두 기본적으로 비행시간법과 측정 원리가 유사하며 짧은 거리보다는 긴 거리 측정 용도로 활용되며 측정 분해능이 낮다. 다 파장 간섭계는 광원으로 여러 개의 파장을 가지는 광원 및 다수의 레이저 광원을 이용하여 거리를 측정하는 방법 [16]으로 높은 정밀도를 가지고 있으나 단일 거리를 측정하기 위해 다수의 광원을 사용하는 한계를 가지고 있다. 백색광 주사 간섭계는 단색광의 위상 모호성을 극복하기 위하여 개발되었으며, 거리 측정보다는 주로 형상 측정 (Surface metrology)에 응용되고 있다. 백색광 주사 간섭계는 백색광의 저간섭성 (Low coherence)을 이용하여, 거리를 측정하기 때문에 기준 거울 및 측정 거울을 주사 (Scanning)해야 하는 단점이 있다 [17]. 그래서 등가 파장간섭계, 주파수 변조 연속파 간섭계, 다 파장 간섭계, 백색광 주사 간섭계는 다 채널 정밀 근접 거리 센서로 응용하기에는 한계가 따른다.

반면, 분산간섭계는 넓은 주파수 대역을 가지는 광원을 이용하여 간섭계를 구성하며, 광 검출기 (Photodetector)로 분광기 (Spectrometer)를 사용하여 주파수 별로 위상을 검출한다. 측정된 위상은 주파수와 선형 관계를 가지고 있으므로, 이를 분석하여 거리를 측정한다 [18]. 높은 분해능으로 빠른 측정이 가능한 장점이 있고 주파수 대역을 적절히 나누어 사용할 수 있는 가능성이 있다. 비록 광원과 분광기의 한계로 인해 측정 영역이 제한되지만 [19], 수 mm 정도의 측정 영역에서는 충분히 거리를 측정할 수 있기 때문에 다 채널 정밀 근접 거리 센서로 응용이 가능하다.

제3절 연구목표 및 내용

본 연구에서는 저간섭성 광원과 분산간섭계 원리를 적용하여 하나의 광 검출기와 하나의 광원을 통해 다수의 채널에서 측정되는 광신호를 확인하고, 이를 실시간으로 신호 처리할 수 있는 다축 측정 광학식 정밀 근접 거리 센서 장치를 제안하고 검증하는 것을 목표로 한다.

이를 위해 본 연구의 세부 연구 내용은 다음과 같다.

- 분산간섭계의 원리 분석 및 측정 성능에 관한 이론적 연구
- 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서 제안
- 분산간섭계의 기초 실험 및 결과 분석
- 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서 설계 및 구현
- 실험 및 성능 평가
- 센서 시스템 시제품 제작

본 논문은 2장에서 분산간섭계의 이론과 제안하는 측정 시스템에 대한 설명, 3장에서는 실험 결과를 통해 측정 시스템의 성능을 평가하는 내용, 4장 고찰 및 논의, 5장 결론으로 구성되어 있다.

제2장 분산간섭계 원리를 이용한 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서

제1절 분산간섭계의 원리

(1) 분산간섭계의 기본 원리

본 연구에서 제안하는 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서는 채널 확장의 용이성 및 거리 측정을 위해 분산간섭계 (Spectrally-resolved interferometry 혹은 Dispersive interferometry)의 원리 [11]를 이용한다. 분산간섭계는 넓은 주파수 대역의 광원을 이용하여 광 주파수별 간섭 신호를 통해 기준광과 측정광 사이의 광학 거리 차이 (Optical Path Difference, OPD)를 측정하는 원리로 mm이상의 측정 영역에서 수 nm의 분해능으로 거리를 측정할 수 있다. Fig. 2-1은 분산간섭계의 일반적인 광학적 구성을 나타낸다. 광원 (Optical source)으로부터 나온 넓은 주파수 대역의 광이 시준렌즈 (Collimator Lens, CL)에서 평행 광으로 바뀐 후, 간섭계로 입사하여 광 분할기 (Beam Splitter, BS)에 의해 기준광 (Reference beam)과 측정광 (Measurement beam)으로 나누어진다. 각각의 광들은 서로 다른 광경로의 기준 거울과 측정 거울에서 반사된 후 되돌아와 간섭을 일으키게 되며, 간섭 신호는 분광기 (Spectrometer)에서 파장별로 획득된다.

이때 분광기에서 측정되는 파장별 광량 (Intensity)는 광 주파수 영역으로 바꾸어 생각할 수 있으며, 광 주파수별 광량 $I(\nu)$ 는 다음과 같이 수학적으로 간단히 나타낼 수 있다 [11].

$$\begin{aligned}
 i(\nu) &= a(\nu) + b(\nu) \cos 2kL = a(\nu) + b(\nu) \cos \left(\frac{4\pi nL}{c_0} \right) \nu \\
 &= a(\nu) + b(\nu) \cos \varphi(\nu)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

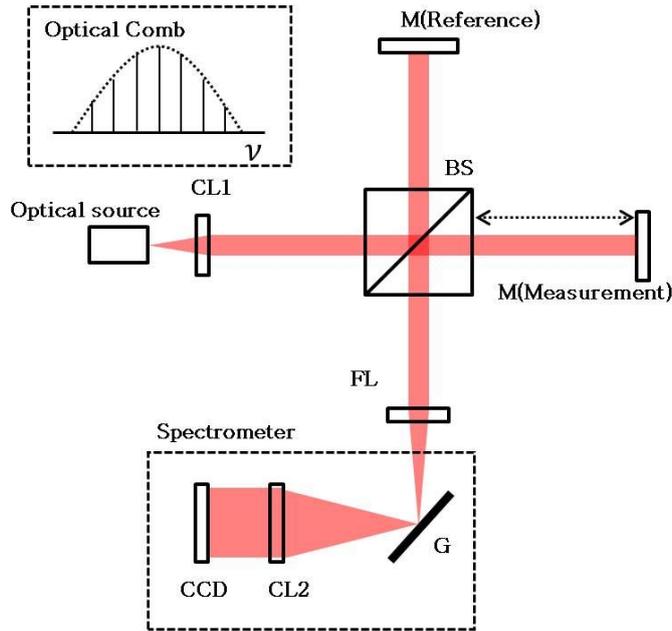


Fig. 2-1. 분산간섭계의 광학 구성 (CL1, CL2; Collimator Lens, BS; Beam Splitter, M; Mirror, FL; Focus Lens, G; Grating)

여기서 k 는 파수 (Wave number)를 나타내고, c_0 는 진공중의 광속 (Speed of light in vacuum)을, n 은 매질의 위상 굴절률 (Phase refractive index)을, ν 는 광 주파수 (Optical frequency)를 의미한다. 식 (1)에서 $a(\nu)$ 는 광 주파수 영역에서 측정된 신호의 평균 광 강도 (Mean intensity)에 해당하고, $b(\nu)$ 는 간섭 신호의 변조 크기 (Modulation amplitude)를 나타내며, 이들은 광원의 주파수 분포, $s(\nu)$ 와 각 거울의 반사계수 $r_r(\nu)$, $r_m(\nu)$ 로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$a(\nu) = \frac{1}{2}s(\nu)[r_r^2(\nu) + r_m^2(\nu)]$$

$$b(\nu) = s(\nu)r_r(\nu)r_m(\nu) \tag{2}$$

실제로, 식 (2)의 $r_r(\nu)$ 와 $r_m(\nu)$ 는 광 주파수 영역에서 상대적으로 균일한 분포를 보이기 때문에 이들을 상수라고 가정할 수 있고, 특히 이를 1로 놓고 생각해 본다면 측정광과 반사광에 의해 생성되는 간섭 신호는 다음과 같이 간단히 정리할 수 있다 [11].

$$i(\nu) = s(\nu)[1 + \cos \varphi(\nu)] \quad (3)$$

Fig. 2-2 (a)는 일반적인 분산간섭계의 간섭 신호를 나타낸다. Fig. 2-2 (a)에서 알 수 있듯이 간섭 신호는 식 (3)에서 표현한 광원의 주파수 특성과 더불어 간섭 신호의 위상 $\varphi(\nu)$ 에 의한 변조 신호를 포함하고 있다. 여기서 분산간섭계에서 측정하기 위한 거리 L 은 간섭 신호의 위상 $\varphi(\nu)$ 에 포함되어 있으며, 이를 다시 정리하면 다음과 같다 [11].

$$\varphi(\nu) = \frac{4\pi nL}{c_o} \nu = 2\pi\alpha\nu \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{2nL}{c_o}$$

분산간섭계에서 거리를 측정하기 위해서는 식 (3)에서 $\varphi(\nu)$ 를 추출해야 하며, 이를 위한 방법으로는 여러 가지가 있지만 그 중에 동기 샘플링 (Synchronous sampling)을 이용하는 방법 [19], 푸리에 변환 (Fourier transform)을 이용하여 첨두 (Peak)를 검출하는 방법 [20, 21] 등이 대표적이다. 동기 샘플링 방법은 간섭 신호 획득과 간섭 신호의 주기를 통한 위상 측정이 동시에 수행되기 때문에, 상대적으로 측정 속도가 빨라지는 장점이 있지만 잡음 (Noise)이 생길 경우 정밀하게 위상을 측정하기에는 어려움이 따른다. 반면, 푸리에 변환을 이용하는 방법은 간섭 신호의 주기를 주파수 영역에서 해석하기 때문에, 거리를 보다 정밀하게 측정할 수 있는 특징을 가지고

있어 일반적으로 많이 사용된다. 이러한 이유로 본 연구에서는 푸리에 변환에 근거한 측정 알고리즘을 도입하였다. 푸리에 변환을 하기 위해 식 (3)을 오일러 공식 (Euler's formular)에 근거하여 다시 표현하면 다음과 같다.

$$i(\nu) = s(\nu) \left[1 + \frac{1}{2} \exp[i\varphi(\nu)] + \frac{1}{2} \exp[-i\varphi(\nu)] \right] \quad (5)$$

여기서 i 는 $\sqrt{-1}$ 을 의미한다. 이때, 식 (5)를 푸리에 변환하게 되면,

$$I(\tau) = FT[i(\nu)] = S(\tau) \otimes \left[1 + \frac{1}{2} \delta(\tau - \alpha) + \frac{1}{2} \delta(\tau + \alpha) \right] \quad (6)$$

와 같은 결과를 얻을 수 있다, 여기서 τ 는 $1/\nu$ 로, 푸리에 영역에서의 변수를 나타내며 물리적으로는 시간 영역에서의 시간 지연 (Time delay)을 의미한다. 또한 $S(\tau)$ 는 $s(\nu)$ 의 푸리에 변환 함수를, $\delta(\tau)$ 는 디랙-델타 함수 (Dirac-delta function)를 나타내며, 식 (6)은 Fig. 2-2 (b)와 같이 표현할 수 있다. Fig. 2-2 (b)를 살펴보면 $\tau = -\alpha, 0, \alpha$, 에서 첨두 (Peak)들이 나타나는 것을 알 수 있으며, 이 첨두들의 위치로부터 α 를 바로 측정할 수 있으므로, 식 (4)를 이용하여 거리 L 을 측정할 수 있다. 그러나 식 (6)과 Fig. 2-2 (b)에서 알 수 있듯이, 푸리에 변환된 각 신호들에는 광원의 주파수 분포에 해당하는 푸리에 변환 함수 $S(\tau)$ 가 곱해지기 때문에, 첨두 출력에 대한 신호들의 폭이 넓어지고 이로써 각각의 첨두의 위치를 정확하게 결정하기에 한계를 가진다. 이를 극복하기 위해 Takeda가 제안한 푸리에-역푸리에 변환 방법 (Fourier-Inverse Fourier transformation method) [22]을 응용하면 위상 정보를 보다 정확히 추출할 수 있다. 푸리에-역푸리에 변환 방법은 식 (6)에서 $\tau = \alpha$ 에 해당하는 신호만을 필터링하여 역푸리에 변환 (Inverse Fourier Transform)을 진행한다. 그러면 얻어지는 신호는 다음과 같다.

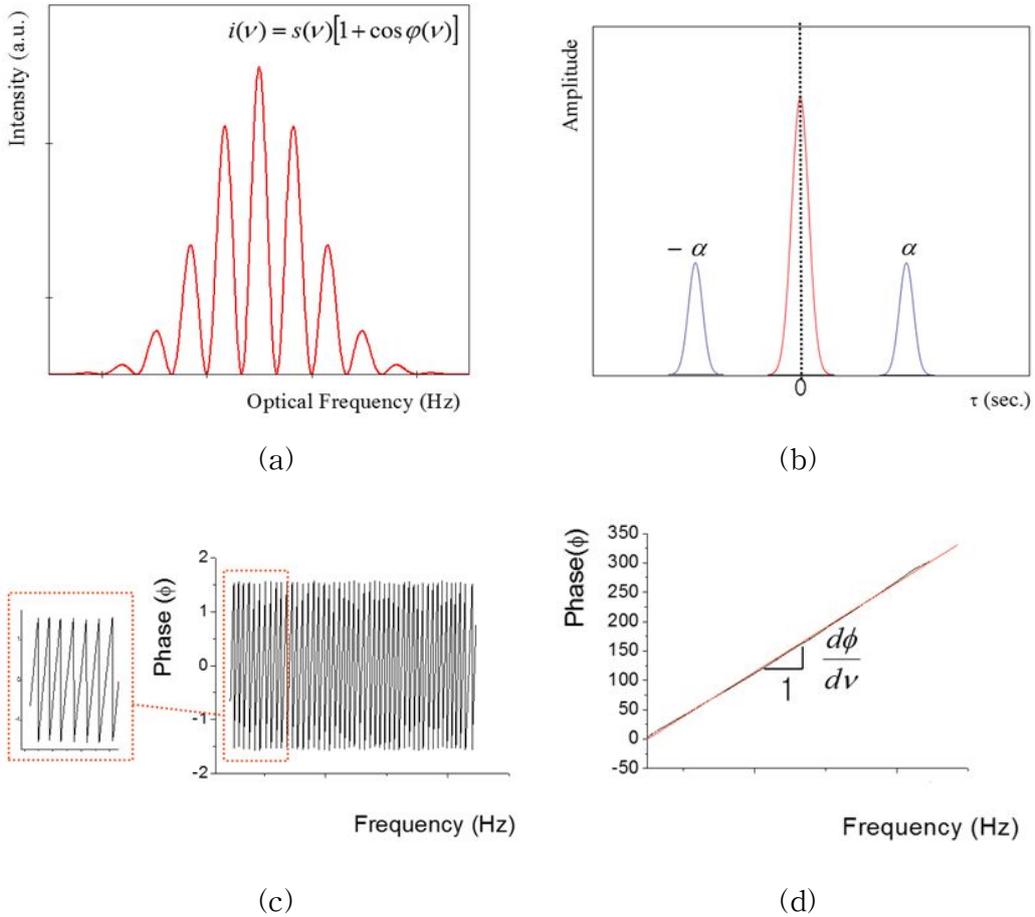


Fig. 2-2. (a) 분산간섭계의 일반적인 간섭 신호, (b) (a)의 푸리에 변환 결과, (c) 광 주파수에 따른 위상, (d) (c)의 Unwrapping 결과

$$\begin{aligned}
 i'(\nu) &= FT^{-1}[I'(\tau)] = s(\nu) \times \frac{1}{2} \exp[i(2\pi\alpha\nu)] \\
 &= s(\nu) \times \frac{1}{2} \exp[i\varphi(\nu)]
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

이후에 위상을 추출하기 위해 식 (7)의 양변에 자연로그 (Natural logarithm)

함수를 취하면, 식 (8)과 같이 얻어지는 신호의 허수 부분이 $\varphi(\nu)$ 가 되므로 $s(\nu)$ 와 상관없이 위상을 정확히 구할 수 있으며, 얻어진 위상으로부터 광 주파수에 해당하는 기울기를 구하게 되면 식 (9)와 같이 거리를 계산할 수 있다 [11].

$$\ln[i'(\nu)] = \ln\left[s(\nu) \times \frac{1}{2} \exp[i\varphi(\nu)]\right] = \ln\left[\frac{s(\nu)}{2}\right] + i\varphi(\nu) \quad (8)$$

$$L = \frac{c_0}{4\pi N_g} \frac{d\varphi(\nu)}{d\nu} \quad (9)$$

여기서 N_g 은 광원의 중심 주파수에 해당하는 매질의 군 굴절률 (Group refractive index)을 나타내게 된다.

(2) 분산간섭계의 측정 영역

분산간섭계는 거리를 측정하기 위해, 넓은 주파수 대역을 가진 광원과 분광기를 통해 각 주파수 별로 위상을 검출하여 거리를 측정할 수 있다. 그러나 실제로, 무한대의 대역 (Bandwidth)을 가지는 광원과 극한의 주파수 분해능 (Frequency resolution)을 가지는 분광기는 존재하지 않으며, 각각 유한한 대역과 분해능을 가지고 있다. 그리고 이러한 특징들은 분산간섭계의 측정 영역을 제한하게 된다.

먼저 광원의 유한한 주파수 대역폭은 분산간섭계의 최소 측정 영역 (Minimum measurable range)을 결정한다. 이를 설명하기 위해, 주파수 영역에서 반치폭 (FWHM, Full Width at Half Maximum)이 $\Delta\nu$ 인 가우시안 분포 (Gaussian distribution)의 광원을 생각하면 Fig. 2-3 (a)와 같으며, 수학적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다 [11].

$$s(\nu) = A \exp \left[-\frac{(4 \ln 2) \nu^2}{\Delta \nu^2} \right] \quad (10)$$

여기서 A 는 주파수 대역에서 광원의 세기를 나타낸다. 이때 식 (10)을 푸리에 변환하면 Fig. 2-3 (b)와 같은 가우시안 분포의 신호를 얻을 수 있으며, 이 신호에서 반치폭 $\Delta \tau$ 는 아래의 식에서 알 수 있듯이 $\Delta \nu$ 의 함수로 나타낼 수 있다 [11].

$$\begin{aligned}
 S(\tau) = FT[s(\nu)] &= \frac{A \Delta \nu}{2 \sqrt{\ln 2 / \pi}} \exp \left[-\frac{(4 \ln 2) \tau^2}{(4 \ln 2 / \pi \Delta \nu)^2} \right] \\
 &= B \exp \left[-\frac{(4 \ln 2) \tau^2}{\Delta \tau^2} \right]
 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\Delta \tau = \frac{4 \ln 2}{\pi \Delta \nu} \quad (12)$$

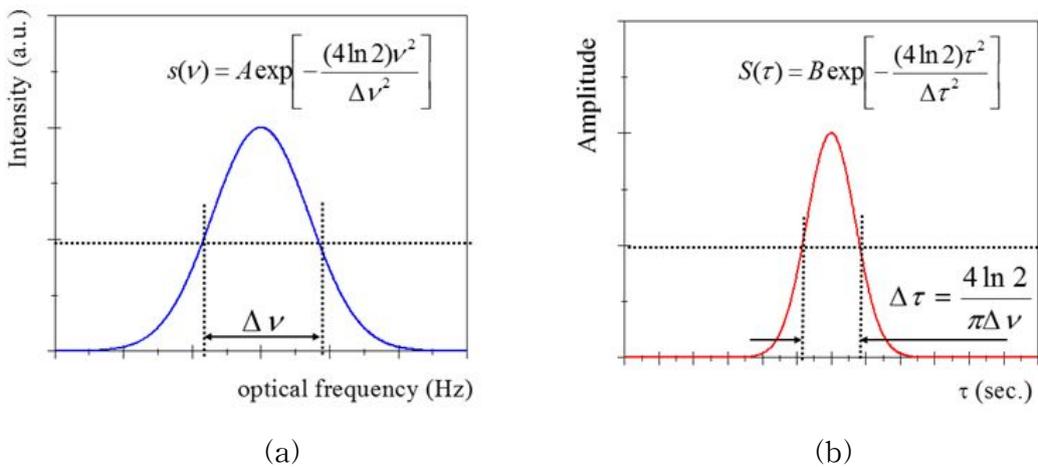


Fig. 2-3. (a) 가우시안 분포의 광원, (b) (a)의 푸리에 변환 결과 [11]

분산간섭계에서는 거리를 측정하기 위해서는 식 (7)에서와 같이 $\tau = \alpha$ 인 신호만을 필터링해야 하지만, 측정 거리가 짧아지게 되면 Fig. 2-4와 같이 $\tau = 0$ 인 신호와 $\tau = \alpha$ 인 신호가 겹쳐지기 때문에 효과적인 필터링이 불가능해진다. 즉, 푸리에 영역에서 DC 성분과 변조신호 성분의 겹침으로 인해, 변조신호의 성분을 찾을 수 없거나, 데이터가 왜곡 될 정도로 가까우면 필터링이 불가능해진다. 이로 인해, 결국 분산간섭계는 최소 측정 영역, L_{\min} 을 가지게 되며, L_{\min} 은 식 (4)와 (12)를 이용하여 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{\min} = \frac{2 \ln 2}{\pi \Delta \nu N} c_0 \quad (13)$$

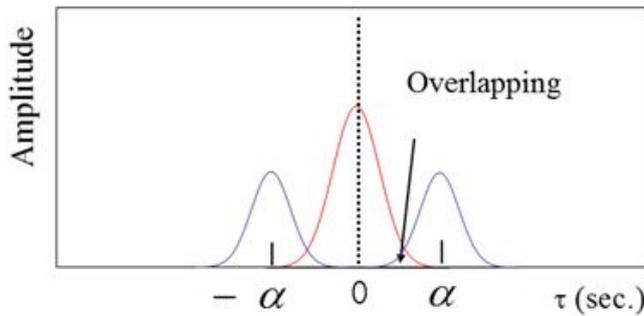


Fig. 2-4. 측정 거리가 최소 측정 영역 이하 일 때의 푸리에 변환 결과

한편, 분산간섭계가 측정할 수 있는 최대 측정 영역 (Maximum measurable range)은 간섭 신호를 검출하는 분광기의 주파수 분해능에 의해 결정된다. 간섭 신호를 분광기로 검출할 때, 이상적인 샘플링 (Ideal sampling)의 경우에는 거리가 길어지더라도 제한없이 측정이 가능하지만, 실제의 경우 간섭 신호는 Fig. 2-5 (a)와 같이 분광기의 주파수 샘플링 폭 $\delta \nu$ 로 샘플링 되기 때문에 이로 인하여 거리 측정에 제한을 받게 된다. 이를 설명하기 위해 분광기에 의해 샘플링된 간섭 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [11].

$$\begin{aligned}
 i_r(\nu) &= \int_{\nu-\delta\nu/2}^{\nu+\delta\nu/2} i(\nu) d\nu = \int_{\nu-\delta\nu/2}^{\nu+\delta\nu/2} s(\nu)[1 + \cos 2\pi\alpha\nu] d\nu & (14) \\
 &= [s(\nu)[1 + \cos 2\pi\alpha\nu]] \otimes \text{rect}\left(\frac{\nu}{\delta\nu}\right)
 \end{aligned}$$

여기서 $\text{rect}(x)$ 는 식 (15)와 같이 정의 된다.

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & (\text{for } |x| \leq 1) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (15)$$

거리 측정을 위하여 식 (14)를 푸리에 변환하는 경우, 변환된 신호는 Fig. 2-5 (b)와 같이 나타나며, τ 영역에서 다음과 같이 표현 가능하다 [11].

$$\begin{aligned}
 I_r(\tau) &= FT[i_r(\nu)] & (16) \\
 &= S(\tau) \otimes \left[1 + \frac{1}{2}\delta(\tau-\alpha) + \frac{1}{2}\delta(\tau+\alpha) \right] \times \text{sinc}(\delta\nu\tau)
 \end{aligned}$$

여기서 $\text{sinc}(x)$ 는 아래의 식과 같이 정의 된다.

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \quad (17)$$

분산간섭계에서 측정 거리가 길어지게 되면, 식 (4)에서 알 수 있듯이 α 가 증가하게 되므로, 식 (16)에서 sinc 함수로 인하여 신호의 크기는 점점 작아져서 잡음과 분간할 수 없게 된다. 결국 Fig. 2-5 (b)에서와 같이 $\alpha > 1/\delta\nu$ 에서는 측정이 불가능해진다. 이와 더불어 분광기의 샘플링 간격이 샘플링 폭과 같은 경우에는 Nyquist 샘플링 이론에 의해 $\alpha > 1/2\delta\nu$ 인 경우에는 신호에 왜

곡이 발생하게 되어 $\alpha = 1/2\delta\nu$ 일 때 분산간섭계는 최대 측정 영역 L_{\max} 를 가지게 된다. 이를 수학적으로 나타내면 다음과 같다 [11].

$$L_{\max} = \frac{c_0}{4N\delta\nu} \quad (18)$$

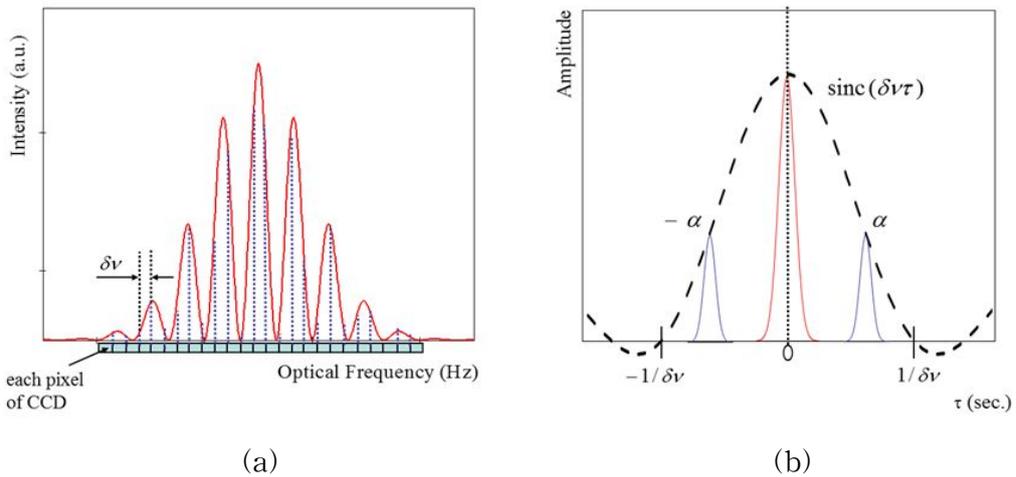


Fig. 2-5. (a) 분광기에서 샘플링 되는 간섭 신호, (b) 샘플링 된 간섭 신호에 의해 발생하는 푸리에 영역에서의 첨두 크기 변화 [11]

결국, 일반적인 백색광 또는 다 파장 광원을 이용한 분산간섭계에서 측정할 수 있는 영역은 식 (13)과 식 (18)을 정리하여 다음과 같이 제한되는 것을 알 수 있다.

$$L_{\min} = \frac{2\ln 2}{\pi\Delta\nu N}c_0 \leq L \leq \frac{c_0}{4N\delta\nu} = L_{\max} \quad (19)$$

예를 들어, 분산간섭계에서 광원으로 할로겐램프 (Halogen lamp)를 사용할 경우, 할로겐램프의 파장 대역은 400 nm에서 700 nm에 해당하고, 간섭 신호를

주파수 분해능이 100 GHz인 분광기로 측정하면, 식 (19)를 이용하여 분산간섭계에서 측정할 수 있는 거리는 $0.8 \mu\text{m} < L < 0.75 \text{mm}$ 가 된다.

(3) 분산간섭계의 분해능

분산간섭계의 거리 분해능은 간섭 신호를 검출하는 분광기의 민감도와 위상을 검출하기 위해 사용하는 푸리에 변환의 분해능으로 결정된다. 그러나 상대적으로 CCD를 이용하는 분광기의 민감도는 매우 우수하기 때문에 이로 인해 결정되는 분해능은 매우 높다. 결국 간섭계의 측정 분해능을 결정하는 가장 큰 요소는 푸리에 변환 시 이용하는 데이터 수에 의한 분해능이 된다. 다시 말해, 푸리에 변환 시 데이터 수를 M 이라 하면, 식 (18)과 (19)를 이용하여 분산간섭계의 분해능은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [11].

$$resolution = \frac{c_0}{4N\delta\nu} \times \frac{2}{M} \quad (20)$$

식 (20)을 통해 알 수 있듯이, 분산간섭계의 분해능을 높이기 위해서는 많은 수의 데이터가 필요하며, 보편적으로 분광기에서 측정된 데이터 수에 영점 채움 (Zero padding)을 하여 간섭계의 분해능을 높이는 방법을 사용한다. 그러나 영점 채움을 많이 하는 경우, 측정 시간이 오래 걸리는 문제가 발생하며, 결국에는 분광기의 민감도에 의한 분해능 한계에 부딪히게 된다. 앞의 할로젠램프를 광원으로 사용하는 예를 생각해 보면, 영점 채움으로 데이터 수를 20480개로 늘리게 되면, 분산간섭계의 분해능은 7.32 nm가 된다.

제2절 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서

(1) 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서

다 채널 광학식 정밀 근접 거리 센서는 측정 프로브와 대상체 간 mm영역에서 거리를 측정할 수 있는 장치로 mm수준의 정밀도 및 반복능을 가지는 동시에 기존의 광학 측정 센서와는 달리 여러 측정 프로브를 통해 여러 거리를 동시에, 측정할 수 있어야 한다.

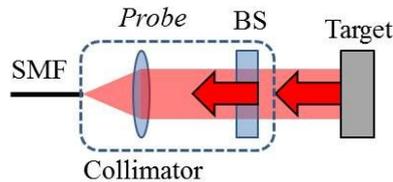
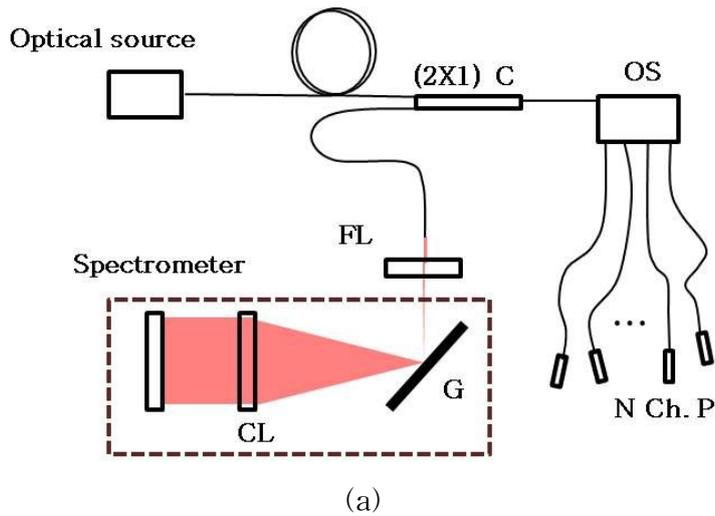


Fig. 2-6. (a) 다 채널 광학식 정밀 근접 거리 센서 개략도 (C; Coupler, OS; Optical Splitter, CL; Collimator Lens, FL; Focus Lens, G; Grating, N Ch. P; N Channel Probe), (b) 측정 프로브의 광학 구성 (SMF; Single Mode Fiber, BS; Beam Splitter

본 논문에서는 이러한 다 채널 광학식 정밀 근접 거리 센서를 구현하기 위해 분산간섭계의 원리를 도입하고, 채널 확장을 위해 다중 광 분할기 중의 하나인 CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexer)를 이용한다. Fig. 2-6 (a)는 제안하는 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서의 광학 구성도를 나타낸다. 광원으로는 넓은 파장 분포를 보이는 동시에 공간 가간섭성 (Spatial coherence)이 우수한 SLD (Super Luminescence Diode)를 사용한다. 광원의 광은 단일 모드 광섬유 (Single Mode Fiber, SMF)를 통해 간섭계로 전달되며, 광 서큘레이터 (Optical circulator)를 지나 CWDM으로 입사한다. CWDM에서는 광의 파장에 따라 N채널로 광을 나누어주며, 각각의 나누어진 광은 각각의 측정 프로브로 진행한다. 측정 프로브는 Fig. 2-6 (b)과 같은 피조 간섭계 (Fizeau interferometer)의 형태로, 광섬유용 시준 렌즈와 광 분할기로 구성되어 있으며, 기준광은 광 분할기에서, 측정광은 측정 대상체에서 각각 반사된다. 이후 각 측정 프로브의 기준광과 측정광은 다시 CWDM에서 모든 파장 대역으로 합쳐지고 광 서큘레이터를 지나 분광기에서 간섭 신호가 획득된다. 이때 각 프로브의 입사광들은 CWDM에서 설정된 파장에 따라 나누어지기 때문에, Fig. 2-7과 같이 분광기에서 측정되는 간섭 신호들은 측정 프로브의 개수만큼 검출되며, 각각의 측정 거리들은 측정된 간섭 신호들로부터 분산간섭계의 원리를 통해 측정된다.

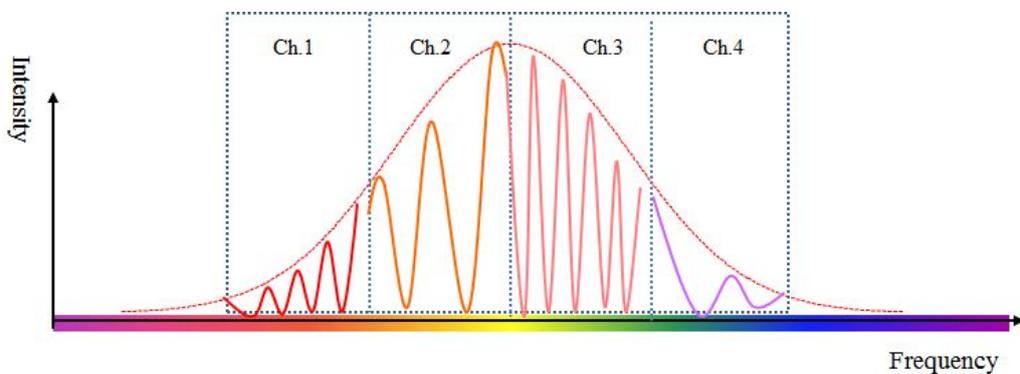


Fig. 2-7. 다 채널 광학식 정밀 근접 거리 센서에서 측정되는 간섭 신호

(2) 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서의 측정 영역

본 논문에서 제안하는 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서는 단일 광원을 이용하여 다 채널을 구현하기 위해, Fig. 2-6과 Fig. 2-7과 같이 CWDM을 이용하여 파장별로 광원의 파장 분포를 나누기 때문에, 이로 인해 각 채널 별로 측정되는 간섭 신호의 파장 폭이 제한을 받는다 [23]. 이 경우, 간섭 신호의 제한적인 파장 폭으로 인해 식 (13)에 의해 결정되는 최소 측정 영역이 커지는 현상이 발생한다. 예를 들어, 측정 프로브의 수가 4로 증가하게 되면 전체 광원의 파장 대역폭 또는 광 주파수 대역폭이 1/4로 감소하게 되기 때문에, 이로 인해 최소 측정 영역은 4배 증가하게 된다. 물론 각 측정 채널에서의 중심 파장이 달라지는 것으로 인해 최소 측정 영역이 변화하는 경향도 보이게 되어 단일 채널의 분산간섭계에 비해 측정 영역이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 최대 측정 영역의 경우에는 동일한 분광기의 사용으로 인해서

단일 채널의 분산간섭계의 최대 측정 영역 보다 크게 달라지지 않는다. 비록, 식 (18)에서 알 수 있듯이 중심 파장의 차이로 인해 최대 측정 영역이 영향을 받기는 하나, 이는 비교적 작은 편이다. 결국, 제안하는 다 채널 측정 시스템에서 채널 수가 증가하게 되면 최소 측정 영역이 채널 수에 비례하여 증가하게 되며, 이는 실제 응용에 있어 측정 프로브와 측정 대상체와의 오프셋 거리 (Offset distance)를 조정해야 함을 의미한다. 그러나 측정 센서에 있어 이러한 오프셋 거리는 길수록 응용에 있어 유리한 면이 있으므로 최소 측정 영역의 증가는 시스템의 성능 면에서 큰 한계로 작용하지 않는 것을 알 수 있다.

(3) 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서의 분해능 및 안정도

제안하는 측정 시스템의 또 다른 중요한 성능 변수는 측정 결과의 분해능 및 안정도이다. 앞서 설명한 바와 같이 다 채널 측정 시스템의 경우, 각각의 측정 프로브에서 획득하는 간섭 신호는 광 주파수 대역에서 제한적이며 이로

인해 측정 데이터의 수가 감소하게 된다. 측정 데이터의 감소는 측정 알고리즘 상에서 푸리에 변환의 분해능을 낮추는 요소이며, 또한 측정 시 발생하는 랜덤 오차에 대해 측정 결과가 영향을 받는다. 이를 해결하기 위해, 기존의 분산간섭계의 경우와 같이 영점 채움을 통해 푸리에 변환 분해능을 증가시키는 방법을 이용할 수 있다. 비록, 측정되는 데이터 수가 측정 채널 수에 의해 감소되기는 하나 영점 채움을 통해 전체 데이터 수가 증가하여 측정 분해능은 크게 저하되지 않는다. 기본적으로 영점 채움의 효과는 측정 시스템의 하드웨어적 민감도 (Sensitivity)를 기본으로 하고 있기 때문에 분광기의 민감도가 우수해야 하나, 분광기의 우수한 민감도를 가정하는 경우, 이론적인 측정 분해능은 단일 채널 분산간섭계의 경우와 같다고 할 수 있다.

반면, 측정 시스템의 안정도의 경우에는 일반적인 분산간섭계에서 적용되는 측정 데이터의 평균화 영향 (Averaging effect)을 통해 잡음을 줄여주는 효과가 다 채널 시스템에서는 감소하게 되어 안정도가 저하되는 현상이 발생한다 [23]. 안정도를 높이기 위해서는 측정 대상체의 위치에 따라 여러 번의 측정을 통한 거리 결과를 산술적으로 평균하는 방법을 사용할 수 있다. 이는 측정 시간이 길어지는 단점이 있으나, 응용 분야에 따라 안정도와 측정 시간을 적절히 조절하여 적용할 수 있다.

제3장 실험 결과 및 분석

본 논문에서 제안한 다 채널 정밀 근접 거리 센서를 실험적으로 검증하고 성능 평가를 위해 결과를 분석하였다. 이를 위해 실험은 다음과 같이 두 단계로 나누어 수행하였다.

- 단일 채널 분산간섭계 실험
- 다 채널 거리 측정 실험

단일 채널 분산간섭계 실험에서는 알고리즘 및 측정 영역, 그리고 측정 분해능을 평가하였다. 이를 통해 본 연구에서 제안하는 측정 시스템의 기본적인 특성을 파악하였다. 이후 진행된 다 채널 거리 측정 실험에서는 광원의 파장 대역을 CWDM을 통해 4개의 영역으로 분기한 후, 각각의 측정 프로브에서 거리가 측정됨을 확인하고, 그에 대한 측정 결과를 분석하였다. 또한 4개의 채널에서 각각의 간섭 신호를 분광기에서 받아들여 간섭 신호와 최대 측정 거리, 반복능, 센서의 민감도를 평가하였다.

제1절 단일 채널 분산간섭계 실험

Fig. 3-1은 본 연구에서 제작한 단일 채널 분산간섭계를 보여준다. 광원으로는 Thorlabs 사의 SLD1005S 모델을 이용하였으며, SLD1005S는 Fig. 3-2와 같이 1550 nm 중심 파장에서 50 nm (FWHM)의 파장 대역을 가지고 있고 평균 출력으로 22 mW를 가지고 있다. 구성을 살펴보면 광원으로부터 광섬유를 통해 간섭계로 입사한 광은 우선적으로 광 서큘레이터를 통해 측정 프로브로 전달된다. 측정 프로브는 Fig. 3-3 (a)의 광학 구성을 바탕으로 Fig. 3-3 (b)와 같이 구성하였다. 광섬유를 통해 전달된 광은 GRIN 렌즈로 이루어진 광 시준기를 통해 평행 광이 되고, GRIN 렌즈 앞단의 광 분할기에서 반사, 투과된다.

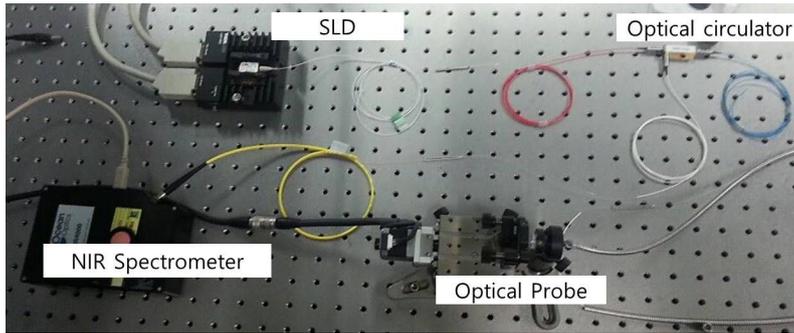


Fig. 3-1. 기초 실험을 위한 단일 채널 광학 정밀 근접 거리 센서 시스템

반사된 광은 간섭계의 기준광으로 사용되고, 투과된 광은 측정 대상체로 향한다. 본 실험에서는 측정 대상체로 평면거울을 사용하였으며 거리 측정을 위해 50 nm 분해능을 가지는 모터 구동 스테이지 (Suruga Seiki 사, XCV630)를 통해 고정된 평면거울을 이동시켰다. 측정 프로브에서 반사된 기준광과 측정광은 다시 광 서큘레이터로 되돌아와 분광기로 입사되고, 분광기에서는 기준광과 측정광을 통해 생성되는 간섭 신호가 측정되었다. 분광기는 Fig. 3-4와 같은 Ocean Optics 사의 NIR Quest 모델을 사용하였으며 NIR Quest는 1520 nm - 1680 nm대역에서 0.3 nm의 분해능을 가진다. 구성한 광원과 분광기를 통해 분산간섭계의 이론적인 측정 영역을 계산하였으며, 그 결과 최소 측정 영역은 21.2 μm , 최대 측정 영역은 2.0 mm였다.

Table 1 단일 채널 실험을 위한 광학 구성 부품의 사양

Component	Specification
SLD 광원	Wavelength : 1550 nm, FWHM : 50 nm, ASE Power : 22 mW
NIR 분광기	Wavelength : 1520~1680 nm, Resolution : 0.3 nm
광 서큘레이터	Wavelength : 1525~1610 nm, SMF
광학 프로브	R : T = 50 : 50



Fig. 3-2. 측정 시스템에 사용된 SLD(1005S)와 스펙트럼



(a)

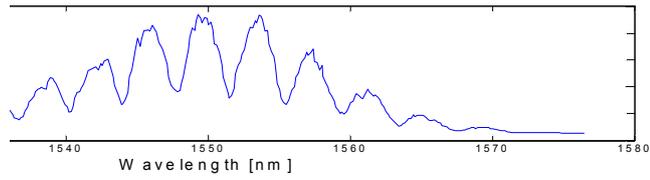
(b)

Fig. 3-3. (a) 프로브 조립 전 (b) 조립 후

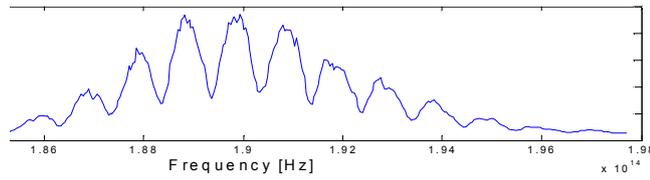


Fig. 3-4. 측정 시스템에 사용된 NIR 분광기와 광학 구성도

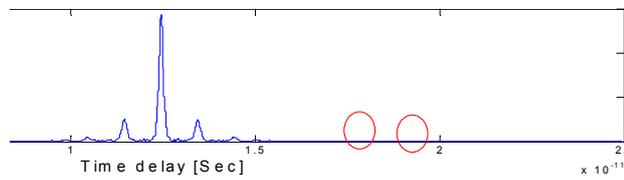
Fig. 3-5 (a)는 측정 거울이 임의의 거리에 위치할 때, 단일 채널 분산간섭계의 분광기에서 획득한 파장별 간섭 신호를 나타낸다. 비록 간섭 신호의 가시도가 다소 저하되었으나 분산간섭계의 측정 원리와 같이 파장 영역에서 주기를 가지는 간섭 신호가 획득되었음을 확인할 수 있다. 간섭 신호가 저하된 이유는 측정 프로브에서의 입사되는 광 손실 및 정렬 등의 문제로 발생하였다고 판단된다. 분석 프로그램에서는 2장에서 설명한 알고리즘을 통해 획득된 간섭 신호로부터 거리 정보를 추출하는데, 이때 획득된 파장별 간섭 신호는 Fig. 3-5 (b)와 같이 분석하기에 앞서 광 주파수 영역으로 신호를 바꾸어 주어야 한다. 획득된 파장별 간섭 신호는 비록 가시적으로 주기 성분을 가지고 있는 것으로 보이지만, 실제로는 식 (3)에서 알 수 있듯이 광 주파수 영역에서 주기 성분을 가지고 있기 때문에, 측정 알고리즘을 적용하기 위해서는 간섭 신호를 Fig. 3-5 (b)와 같이 광 주파수 영역으로 나타내어야 한다. 또한 광 주파수 영역으로 간섭 신호를 변경할 경우, 샘플링 된 간섭 신호는 광 주파수 영역에서 등 간격으로 나타나지 않기 때문에 이를 내삽 (Interpolation)을 이용하여 등간격의 간섭 신호를 생성하였다. 그리고 이 신호를 이용하여 푸리에 변환을 하면 Fig. 3-5 (c)와 같이 시간 영역에서 간섭 신호에 해당하는 변조 주파수의 첨두 (Peak)를 확인할 수 있었다. Fig. 3-5 (c)를 살펴보면 빨간색 원으로 표시한 첨두는 측정 프로브와 측정 거울 사이의 거리에 의한 신호를 나타내며, 그 이외의 첨두들은 두 거울면 사이의 다중 반사에 의한 신호를 나타낸다. 이후 Fig. 3-5 (c)에서 측정 거리에 따른 간섭 신호의 첨두 영역만을 역 푸리에 변환한 후, Fig. 3-5 (d)와 (e)와 같이 획득한 위상에 대해 Unwrapping을 수행하여 Fig. 3-5 (e)와 같은 위상의 기울기로부터 거리를 추출하였다. 이때, 분석과정의 푸리에 변환에서 측정 데이터는 영점 채움을 통해 2^1 개로 데이터 수를 증가시켰으며, 이를 통해 측정 분해능은 식 (20)에 의해 1.9 nm가 됨을 알 수 있다.



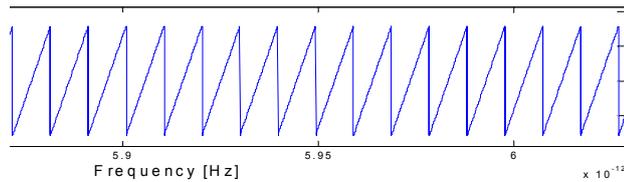
(a)



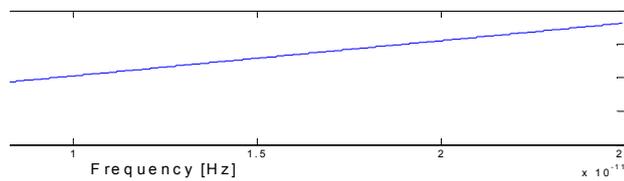
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 3-5. (a) 분산간섭계의 파장별 간섭 신호, (b) (a)를 광 주파수 대역으로 변환한 결과, (c) (b) 푸리에 변환한 결과, (d) 광 주파수별 위상, (e) (d) Unwrapping 결과

단일 채널 분산간섭계의 성능 및 측정 영역을 확인하기 위해 Fig. 3-1과 같이 측정 거울을 모터 구동 스테이지에 부착하여 20 μm 간격으로 약 1.8 mm 까지 이동시키면서 거리를 측정하였다. 측정 프로브의 구조상 측정 대상체가 측정 프로브에 닿지 않도록 조정하였으며, Fig. 3-6과 같이 대략 0.16 mm의 영역에서 1.7 mm까지 거리가 측정되는 것을 확인하였다. 이론적인 측정 영역이 2 mm인데 반해 측정이 1.7 mm까지만 수행된 이유는 이론에 따른 실제 실험에 있어 측정 잡음 (Noise)에 의해 측정 거리가 길어지면서 신호잡음비 (Signal to Noise Ratio, SNR)가 작아지고 이로 인해 1.7 mm 이상의 거리에서는 측정이 수행되지 않았기 때문이다. 본 실험을 통해 구성된 단일 채널 분산간섭계의 성능을 확인하였고 이론적인 분석과 더불어 실험적으로 검증하였다.

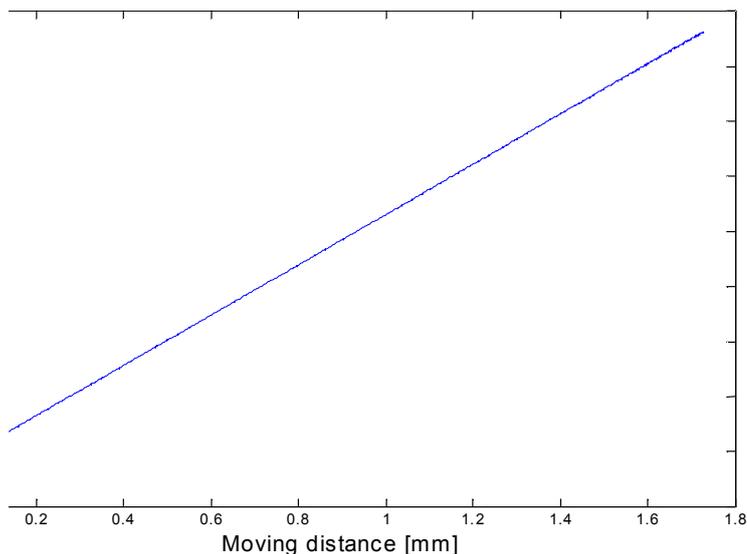


Fig. 3-6. 단일 채널 분산간섭계를 이용한 거리 측정 결과

제2절 다 채널 거리측정 실험

단일 채널 분산간섭계의 원리를 실험적으로 검증한 이후, 본 연구에서는 제안하는 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서를 Fig. 3-7과 같이 구성하였다. 단일 채널 분산간섭계의 기본적인 광학 구성에 더하여 CWDM을 이용하여 1550 nm 중심 파장을 갖는 저간섭성 광원의 스펙트럼을 1530 nm, 1550 nm, 1570 nm, 1590 nm의 4개의 채널로 파장을 나누었다. 이때 CWDM에서는 각각의 채널에서 20 nm의 파장 대역폭을 가지도록 설계, 제작되었다.

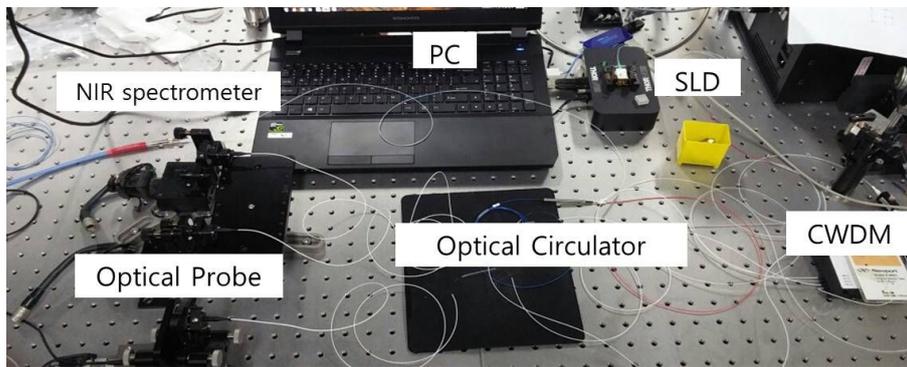


Fig. 3-7. 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서의 시스템 구성 (SLD; Super Luminescence Diode, OC; Optical Circulator, CWDM; Coarse Wavelength Division Multiplexing)

Table 2 다 채널 실험을 위한 광학 구성 부품의 사양

Component	Specification
SLD 광원	Wavelength : 1550 nm, FWHM : 90 nm, ASE Power : 2.0 mW
NIR 분광기	Wavelength : 1520~1680 nm, Resolution : 0.3 nm
광 서클레이터	Wavelength : 1525~1610 nm, SMF
광학 프로브	R : T = 50 : 50
다중 파장분할기	1530, 1550, 1570, 1590 nm (4Ch.)

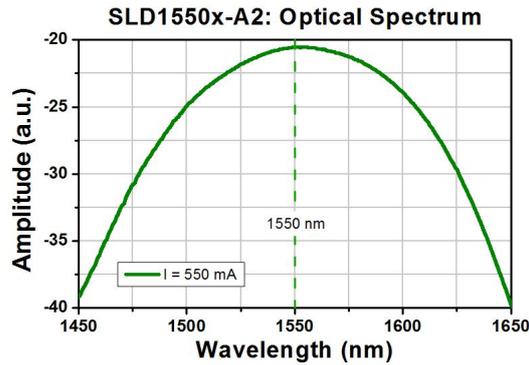


Fig. 3-8. SLD1550S-A2의 광원 파장 분포

광원으로는 단일 채널 분산간섭계와는 달리 Fig. 3-8과 같은 90 nm의 비교적 넓은 파장 대역폭을 가지는 1550 nm 중심 파장의 SLD(SLD1550S-A2, Thorlabs)를 사용하였으며 분광기는 단일 채널 분산간섭계 실험에서 사용한 것과 동일한 분광기를 사용하였다. 이때 사용한 광원과 분광기, 프로그램을 통해 각 측정 채널에서의 측정 영역을 계산하였다. 그 결과 최소 측정 영역은 55 μm 였으며, 최대 측정 영역은 2.0 mm였다. 또한 동시에 4개의 측정 프로브에서 거리가 측정됨을 확인하기 위해 4개의 프로브들의 앞에 Fig. 3-9와 같이 각각의 측정 거울들을 설치하였으며, 거리 측정을 위해 모든 거울들은 모터 구동 스테이지에 부착하였다. 또한 각 측정 프로브에서 생성된 간섭 신호들은 CWDM을 통해 모든 파장 대역에서 합쳐지며, 분광기에서 Fig. 3-10과 같이 간섭 신호가 검출되었다.

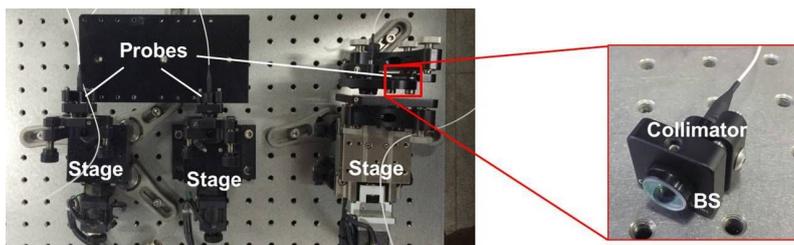


Fig. 3-9. 다 채널 광학 근접 거리 센서 실험을 위한 시스템 구성과, 프로브 구성

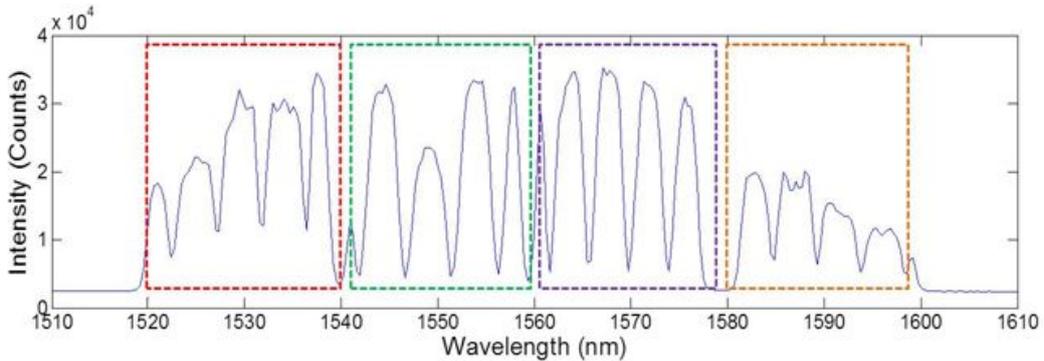


Fig. 3-10. NIR 분광기 모듈에서 각 채널별로 동시 측정 된 프로브 간섭 신호

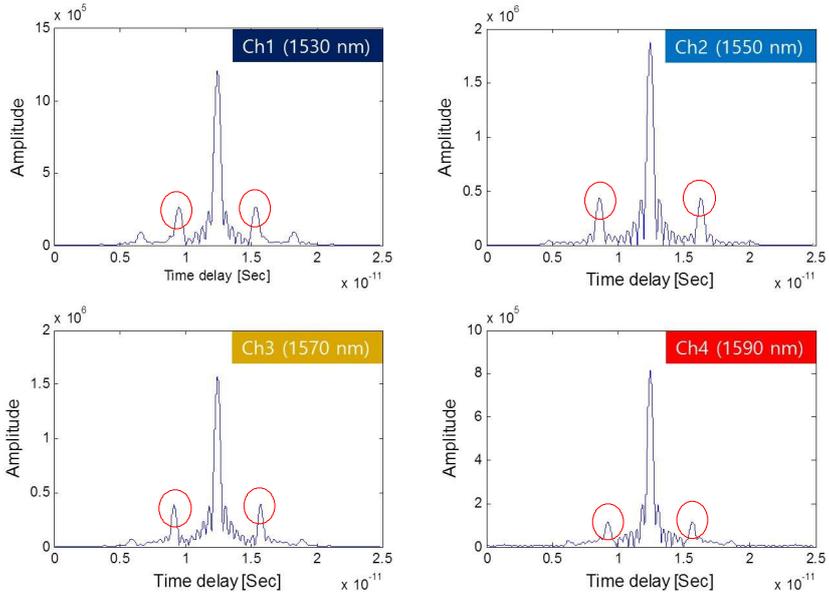
이들 간섭 신호를 분석하기 위해, 각각의 채널에 해당하는 파장 대역을 CWDM의 성능 사양에 따라 나누고, 단일 채널 분산간섭계의 측정과 동일한 과정으로 각각의 간섭 신호에 대한 분석을 수행하였다. Fig. 3-11 (a)는 각각의 측정 프로브에서 획득한 광 주파수별 간섭 신호에 대해 푸리에 변환한 결과를 보여준다. Fig. 3-10에서 알 수 있듯이, 전체 광원의 파장 대역을 CWDM으로 나누다보니 각 측정 채널에서의 스펙트럼 모양이 왜곡되어 나타나고 있음을 알 수 있고, 이러한 왜곡 현상은 Fig. 3-11 (a)와 같이 푸리에 변환에서도 첨두들의 왜곡 현상을 발생시킨다. 그러나 여전히 거리에 따른 간섭 신호에 해당하는 첨두는 빨간색 점들과 같이 확인할 수 있음을 알 수 있고 이들 첨두들만을 필터링하여 역 푸리에 변환한 결과 Fig. 3-11 (b)와 같이 광 주파수별 위상을 획득할 수 있었다. 그리고 unwrapping 과정을 통해 궁극적으로 선형 위상을 획득하였으며, 위상 기울기를 통해 각각의 측정 채널에서 거리 정보들을 독립적으로 추출하였다. 이를 통해 구현한 다 채널 측정 시스템에서 각각의 채널별 간섭 신호가 분광기와 알고리즘을 통해 획득됨을 확인하였고, 각각의 채널들이 서로 독립적인 간섭무늬를 가지면서 거리가 측정되고 있음을 확인할 수 있었다.

고정 된 한 점에서의 다 채널 거리 측정 시스템을 검증한 이후, 각각의 측

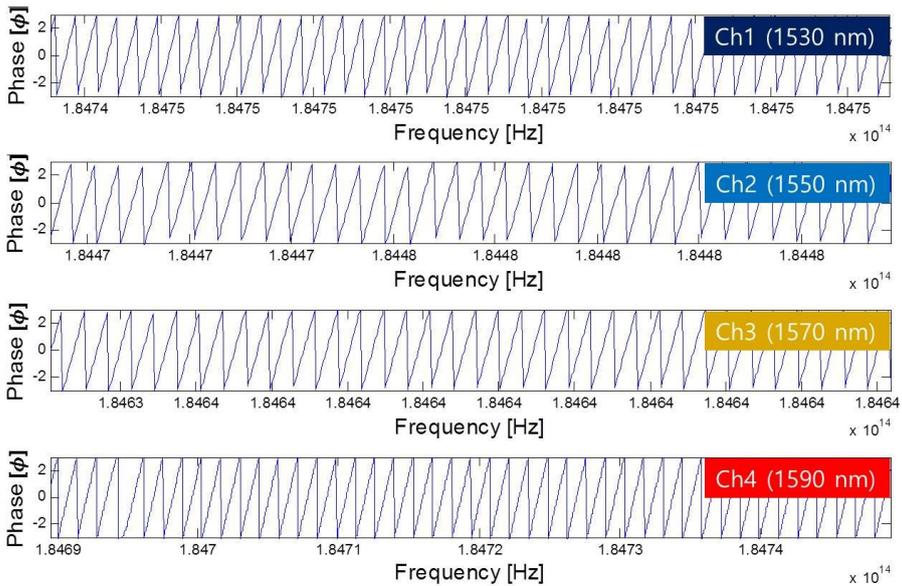
정 채널에서 측정 거울들을 모터 구동 스테이지로 구동시키면서 거리 측정 실험을 수행하였다. 우선, 구성된 측정 시스템에서 각 채널별 측정 영역을 확인하기 위해 스테이지를 5 μm 간격으로 1.4 mm까지 구동하면서 거리 측정을 수행하였다. 실험 결과, Fig. 3-12에서 알 수 있듯이 모든 측정 채널에서 1.4 mm 정도까지 거리가 측정되는 것을 확인 하였으며 이는 이론적인 최대 측정 영역인 2.0 mm에 비해 다소 작게 측정되었으며 단일 채널 분산간섭계의 경우와 마찬가지로 거리가 길어짐에 따라 SNR이 작아지는 현상에 의한 것으로 판단된다. 본 실험에서는 단일 채널 분산간섭계의 실험과 동일하게 측정 프로브의 안전을 위해 프로브와 측정 거울은 어느 정도 윽셋 거리를 유지한 채 실험을 수행하였다. 결과적으로 구성된 다 채널 광학 정밀 근접 거리 센서는 0.2 mm - 1.4 mm의 영역에서 측정이 가능함을 확인하였고 측정 영역이 1.2 mm 정도임을 보였다. 또한, 측정 결과들의 구동 거리에 따른 선형성 (Linearity) 을 평가한 결과, 모든 채널에서 선형성이 0.6% 이내임을 확인하였다.

한편, 다 채널 거리 측정 시스템의 측정 반복능을 평가하기 위해 4개의 측정 프로브들 및 측정 거울들을 임의의 위치에 고정시킨 후 연속적인 반복 측정으로 측정 반복능을 평가하였다. 측정은 0.1초 간격으로 20번 반복 측정 한 결과의 표준편차 값을 산출하였으며, 그 결과 Fig. 3-13과 같이 모든 채널에서 20 nm 이하의 반복능을 가짐을 확인 할 수 있었다. 또한 측정 시스템의 분해능은 측정 프로그램 상에서 푸리에 변환 시 측정 데이터에 영점 채움을 적용하여 데이터 수는 2^{21} 으로 확장하였고, 이를 통해 각 채널에서 분해능이 1.9 nm 이하임을 확인하였다.

최종적으로 구현한 측정 시스템의 안정도를 평가하기 위해, 1550 nm 중심 파장의 측정 채널에서 측정 거울과 측정 프로브를 15분 동안 고정 시킨 후, Fig. 3-14 (a)와 같이 거리를 측정하였다. 이때, 환경 변화에 따른 잡음을 최소화하기 위해 항온 실험실에서 실험이 수행되었으며, 그 결과 Fig. 3-14 (b)와 같이 알란 편차 (Allan deviation)값 기준으로 30 nm 이하의 안정도를 보이고 있음을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 3-11. 각 측정 채널별 분석과정, (a) 간섭 신호의 푸리에 변환 결과, (b) 광 주파수별 위상

구성된 시스템의 채널별 성능을 확인한 결과, 측정 프로브 2, 3 채널의 성능이 1, 4 프로브 채널에 비해 안정도 및 선형성에서 우수한 결과를 보였다. 이는 Fig. 3-10에서 알 수 있듯이 채널 2,3의 간섭 신호가 다른 채널들에 비해 비교적 안정적으로 획득되었기 때문이며, 이는 광원의 스펙트럼 모양에 의해 영향을 받았다.

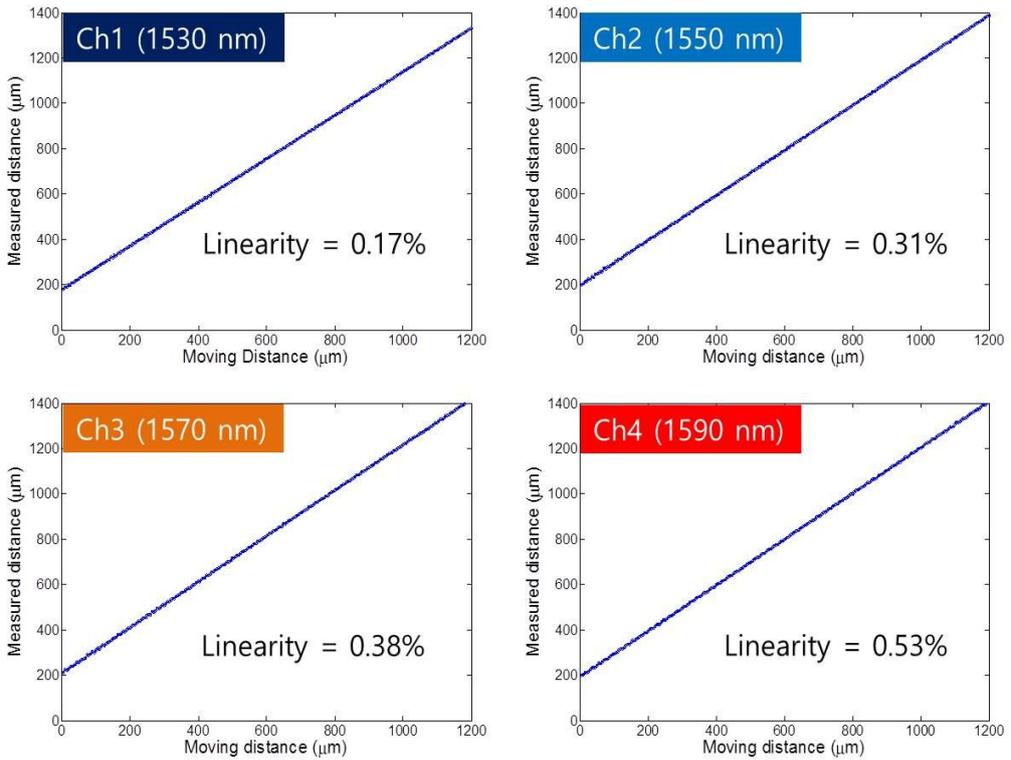


Fig. 3-12. 측정 채널별 거리 측정 결과 및 측정 영역 확인

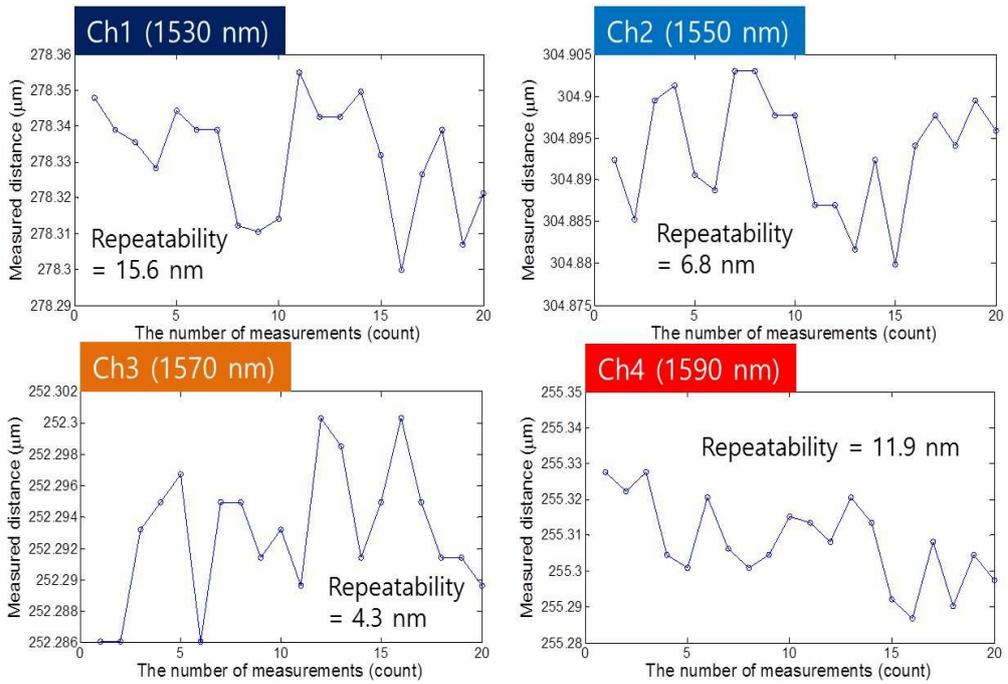
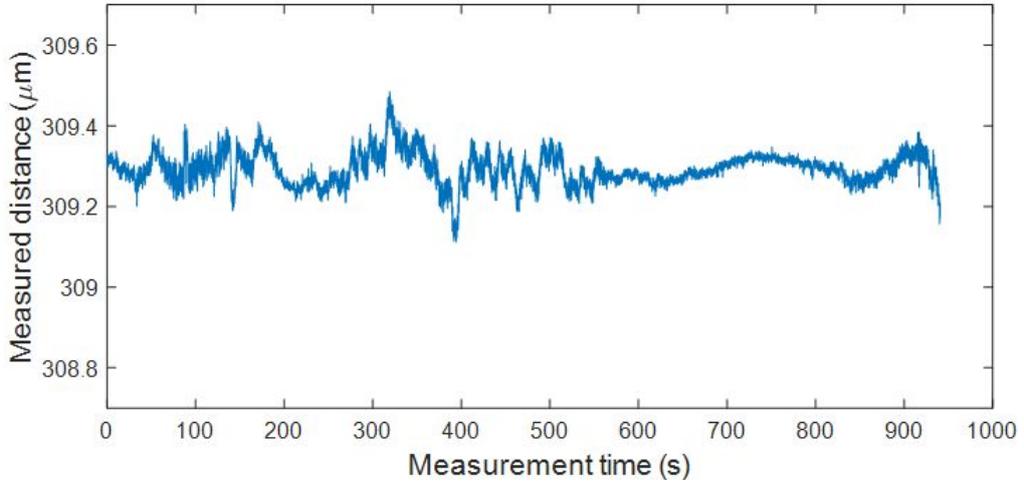
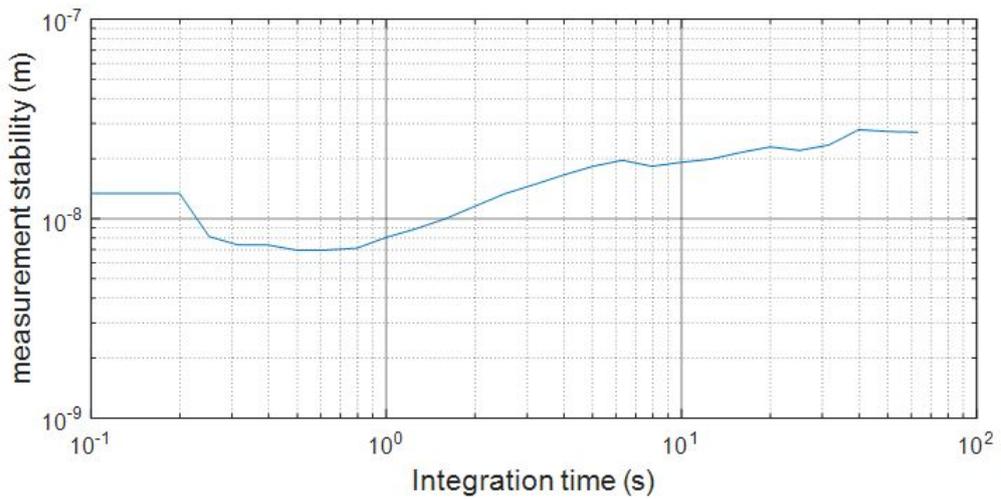


Fig. 3-13. 다 채널 광학적 정밀 근접 거리 측정 센서의 채널별 반복능 평가



(a)



(b)

Fig 3-14. (a) 15분 동안 고정 된 거리 측정 결과, (b) (a)의 Allan deviation 값

제3절 다 채널 광학 근접 거리 센서의 제품화

(1) 하드웨어 구성

단일 채널 분산간섭계와 다 채널 정밀 근접 거리 센서의 측정 영역, 분해능, 반복능 등 관련된 기초 실험이 수행 된 이후, 측정 시스템을 Fig. 3-15과 같이 시제품으로 제작하였다. 시제품의 경우, 광학 파트와 전자 파트를 각각 나누어 설계하였으며, 전원부와 광학 부품들과 광원부, 광 검출부를 패키징하기 위한 케이스를 Fig. 3-16과 같이 SolidWorks로 설계하여 제작하였다. 이후, 광학소자들과 더불어 조립하여 전체 측정 시스템을 구성하였으며, 최종적으로 시제품을 완성하였다. 측정시스템과 측정 프로브 간 연결은 4개의 FC/PC 단자를 이용하였으며, 광원의 광량을 조절하기 위한 광 감쇠기(Optical attenuator)를 측정 시스템 내에 설치하였다. 이는 측정 대상물에 대한 반사도에 따른 광의 세기 조절을 가능하기 위함이다.

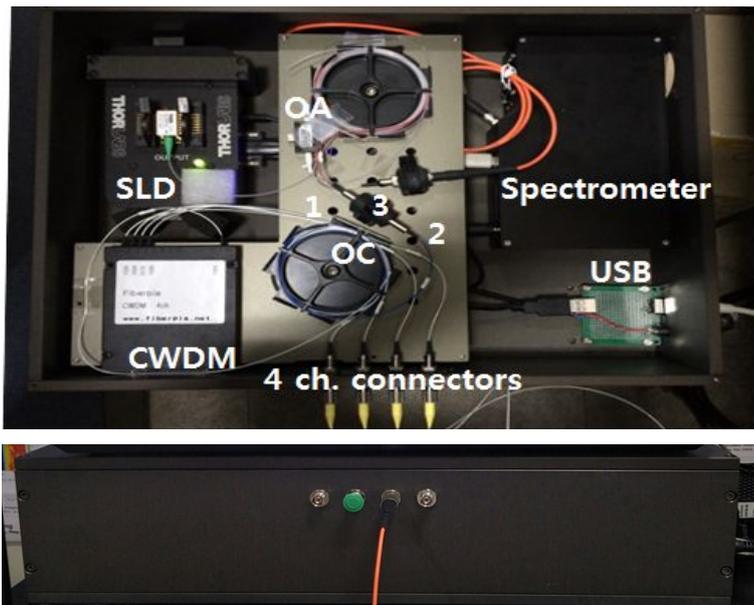
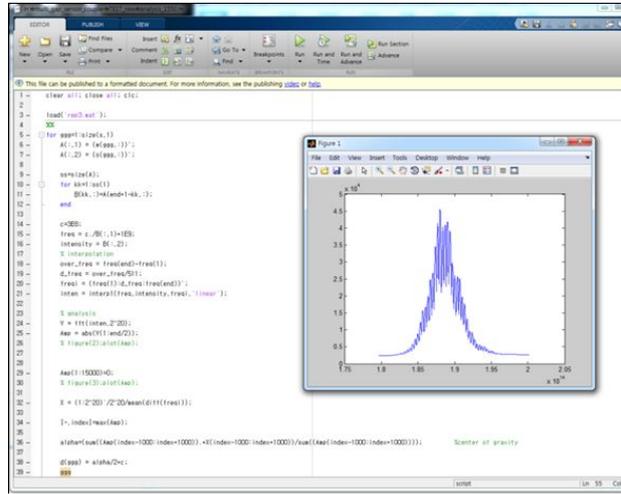


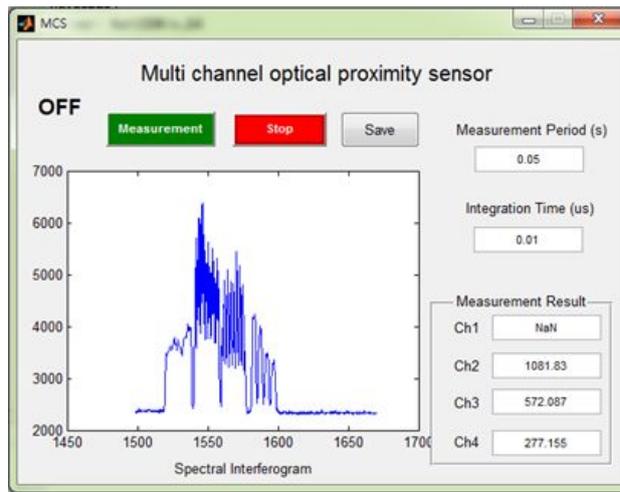
Fig. 3-15. 다 채널 광학 정밀 거리 근접 센서 시스템 시제품 완성 모습

(2) 소프트웨어 구성

측정 소프트웨어는 Matlab 소프트웨어를 통해 Fig. 3-17 (a)와 같이 개발하였고 이를 이용하여 분산간섭계의 원리 기반 측정 알고리즘을 구현하였다.



(a)



(b)

Fig. 3-17. (a) Matlab 소프트웨어로 구현된 측정 알고리즘과
(b) Matlab GUI 기반 측정 소프트웨어

측정 프로그램에서 푸리에 변환 시 측정 데이터에 영점 추가를 적용하여 측정 분해능을 향상시켰으며, 영점 채움을 통해 데이터 수는 2^{21} 가 되도록 구성하였다. 프로그램의 실행은 Fig. 3-17 (b)와 같이 Matlab GUI를 통해 이루어지며, GUI의 프론트 패널을 보고 사용자가 간단한 버튼을 이용하여 편리하게 실시간으로 측정 신호를 확인하고, 거리를 바로 확인할 수 있는 소프트웨어를 개발/적용하였다. 프로그램을 통해 측정 속도는 분광기의 검출시간, 거리 계산 시간을 고려한 결과 0.1초 이하임을 확인하였다.

(3) 시제품의 성능 평가

① 분해능

분해능에 대한 성능 평가는 측정 시스템의 민감도를 기준으로 정의하였으며, Matlab 프로그램으로 알고리즘을 구현 한, 측정 소프트웨어 상의 측정 분해능과 거리 측정 결과의 끝 자리수를 통해 평가했다. 분광기의 분해능을 통한 측정 시스템의 최대 측정 거리 (2.0 mm)와 알고리즘 상의 영점 채움을 통한 데이터 개수 (2^{21})으로 분해능은 $2.0 \text{ mm} / 2^{21} \times 2 = 1.9 \text{ nm}$ 로 계산되었고, 이를 실험적으로 확인하기 위해 소프트웨어 상에서 거리 측정 결과를 확인한 결과 1 nm 자릿수에서 거리 측정에 대한 민감도를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 한국표준과학연구원 (KRISS)에서 이와 같은 내용을 근거로 본 측정 시스템의 분해능 (민감도)에 대해 인증하였다.

② 측정 영역

구성한 시제품의 측정 영역은 한국표준과학연구원에서 기보유한 레이저 변위 간섭계와 비교실험을 통해 스테이지 (XCV630, Suruga Seiki)구동에 따른 거리 측정 결과로 측정 영역을 확인하였다. 200 μm 간격으로 스테이지를 구동하여 0에서 1.4 mm까지 7번 움직이며 레이저 변위 간섭계와 개발한 측정 시스템의 측정 결과를 비교하였다. 측정 결과, 개발한 측정 시스템이 300 μm 의 옅섯 거리부터 시작하여 1.5 mm까지 측정이 됨을 확인하였으며, 이를 통해 측

정 영역이 1.2 mm 정도로 확인하였다.

③ 반복능

시제품의 반복능은 측정기 자체의 반복적인 측정 정밀도를 의미하며, 이는 측정기의 안정도로 단시간 동안 정해진 횟수 만큼의 측정 결과의 표준편차로 정의하고, 한국표준과학연구원에서 본 측정 시스템의 반복능을 평가하기 위해 0.1초 간격으로 20번 반복 측정한 이후 측정된 결과들의 표준편차로 반복능을 평가하였다. 평가에 관련되어 측정 결과 연구에서 제시한 1530, 1550, 1570, 1590 nm의 채널 모두 본 연구에서 20 nm 이하의 반복능을 나타냄을 확인하였다.

제 4 장 고찰 및 논의

(1) 측정분해능과 반복능

본 논문에서는 단일 채널로 이루어진 분산간섭계와 다 채널 근접 거리 센서를 구성하고 실험적으로 성능을 검증하였다. 단일 채널 분산간섭계와 다 채널 근접 거리 센서에서 가장 큰 차이점은 광원의 파장 대역폭으로 단일 채널 분산간섭계에서는 50 nm의 대역을 가지는 광원을 사용한 데 반해 다 채널 근접 거리 센서에서는 90 nm 대역의 광원을 사용하였다. 이는 다 채널 근접 거리 센서에서는 전체 파장 대역을 채널 수에 따라 분기하여 이용하기 때문에 비록 전체 파장 대역은 90 nm이나 센서의 각 채널별 사용 파장 대역폭은 20 nm에 해당한다. 그래서 단일 채널 분산간섭계에서는 100 여개의 데이터를 이용할 수 있지만, 다 채널 근접 거리 센서에서는 각 채널별로 60 여개의 데이터만을 이용하였다. 이러한 데이터 수의 감소는 앞서 2장에서 밝힌 바와 같이, 측정 시스템의 반복능 및 안정도, 분해능을 저하시키는 요인이 된다. 이를 극복하기 위해서는 광원으로 보다 넓은 파장 대역폭을 가지는 광원을 사용하고, 이를 통해 측정 데이터를 충분히 확보하는 것이 필요하다.

(2) 프로브의 구성과 사이즈

본 논문에서 다 채널 근접 거리 센서의 측정 프로브는 상용화된 광섬유 시준기와 광 분할기, 광학 마운트를 통해 Fig. 4-1과 같이 구성하였다. 간섭 신호의 획득을 위해 광 분할기의 정렬이 필요하고, 이를 위해 Kinematic 마운트를 추가로 구성함으로써 측정 프로브의 크기는 비교적 커졌다. 그러나 실제로 제안한 시스템을 근접 거리 센서로 활용하기 위해서는 측정 프로브의 크기를 최소화하여야 하며, 보다 간단한 구성으로 측정 프로브를 다시 제작해야 할 필요성이 있다. 초소형 측정 프로브를 위해서는 기존의 프로브에서 광학 마운트 부분이 제거되어야 하며, 간단한 구성을 위해 광학 부품의

수를 줄여야 한다. Fig. 4-2는 1차로 제작한 측정 프로브의 크기를 최소화하는 동시에 측정 성능을 개선시킬 수 있는 2차 측정 프로브의 광학 구성도 및 제작된 프로브를 보여준다.

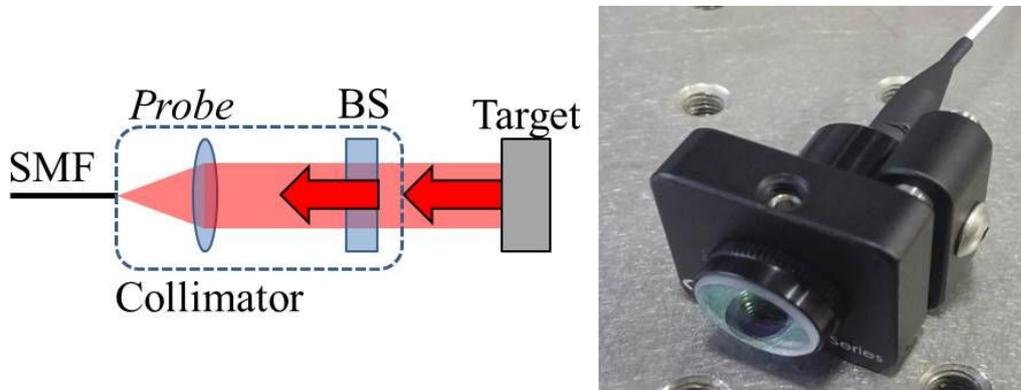


Fig. 4-1. 설계, 제작된 1차 광학 프로브 구성도와 실제 구성된 모습

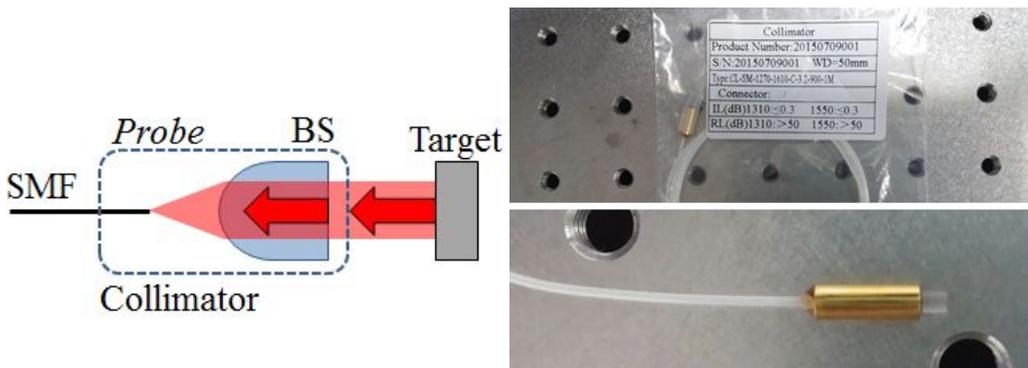


Fig. 4-2. 설계, 제작된 2차 광학 프로브 구성도와 실제 구성된 모습

1차 프로브와는 달리 광 분할기의 정렬을 위한 광학 마운트가 제거되었으며, 광 분할기 대신에 광섬유 시준기의 앞단에 광분할 코팅을 하여 광학 부품의 수를 줄였다. 이 경우, 광섬유 시준기의 앞단에서 반사되는 광은 다시 광섬유에 되돌아 갈 수 있도록 설계되었으며, 전체적인 크기는 직경 2 mm 수준의 초소형 측정 프로브의 제작이 가능하였다. 또한 구성된 2차 프로브는 광학

소자들 사이에서 일어나는 손실을 1차 프로브보다 줄일 수 있어 광효율이 우수하다. 제작된 2차 프로브는 차후 미세 구멍 측정 등의 다양한 응용분야에 보다 용이하게 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

(3) 비용적 측면, 소자의 개발

본 논문에서 제작된 다 채널 정밀 거리 측정 센서 시스템은 구성함에 있어 1550 nm 대역의 분광기의 이용으로 인해 많은 비용이 소요되었다. 이는 NIR 대역에 사용되는 광검출 소자인 InGaAs 광 검출기의 높은 비용과 열적 안정도를 높이기 위한 소자들로 인해 분광기의 가격상승이 주된 이유였다. 그래서 센서 시스템의 전체 비용을 줄이기 위해서는 1550 nm 대역의 분광기 대신에 가시광 대역의 분광기를 사용해야 하며, 이 경우 분광기의 소요 비용을 1/2로 줄일 수 있다. 그러나 가시광 대역의 분광기를 사용하는 경우에는 시스템 구성에 필요한 광 섬유 소자들도 가시광 영역의 소자들로 교체가 되어야 한다. 특히, CWDM의 경우에는 현재 1550 nm 대역에서만 상용화되어 있기 때문에 가시광 영역의 센서 개발을 위해서는 가시광 대역의 CWDM 개발이 필수적이다. 이와 더불어, 가시광 영역에서의 넓은 파장 대역의 광원의 개발도 진행되어야 한다.

(4) 자체 평가 및 성능 시험 인증

본 논문에서는 다 채널 정밀 거리 측정 센서에 대해 자체적인 실험실 차원에서의 성능 분석과 한국표준과학연구원에서 성능 시험 인증 평가를 진행하였다. 자체적으로 실험실에서 수행한 성능 평가에서는 채널 별 거리 측정에서 5 μm 간격으로 측정하면서 채널별로 1.2 mm 정도의 거리 측정이 가능함을 확인하였으며, 시험 인증 평가에서는 200 μm 간격으로 구동하면서 확인한 결과 동일하게 1.2 mm의 거리 측정이 가능함을 확인하였다. 또한 0.1초 간격으로 20번 반복 측정하여 표준 편차 값으로 측정 시스템의 반복능을 평가한 결과, 모두 20 nm 이하의 반복능을 확인하였다.

그러나 측정 시스템의 분해능은 푸리에 변환 시에 적용하는 데이터 수에

의해 결정되는 값으로 이는 실제 측정 시스템의 분해능으로 판단하기에는 무리가 있으며, 보다 정확한 분해능 평가는 안정적인 환경 조건 하에서 정밀한 구동 장치를 통해 확인되어야 한다. 향후, 분해능 평가 및 시스템의 불확도 평가는 추가적인 실험과 분석을 통해 진행되어야 할 것으로 판단된다.

제 5 장 결론

본 연구에서는 저간섭성 광원과 분산형 간섭계 원리를 적용하여 비교적 짧은 측정 영역에서 수십 나노미터 수준의 높은 반복능과 분해능을 가지는 다 채널 광학식 정밀 근접 거리 센서를 제안하고 이를 이론적, 실험적으로 검증하였다. 제안한 측정 시스템은 기존의 전자식 근접 센서 및 광학식 센서에 비해 측정 대상체의 전도성과 관계없이 다 채널로 거리를 측정할 수 있는 장점이 있다. 또한 기존의 광학식 센서에 비해 비교적 간단하게 채널 확장이 가능하다. 센서 시스템은 내부에 광섬유 기반의 다중 광 분할기를 구성하여 근접 거리 센서의 다축 측정이 가능하도록 하드웨어를 설계, 제작되었으며 하나의 분광기와 알고리즘을 통해 다수의 채널에서 측정되는 광 신호를 동시에 신호 처리할 수 있다. 또한 측정 프로브는 광 분할기, 광섬유용 광 시준기 등을 이용하여 구현하였다.

한편 본 연구에서는 제안한 측정 시스템의 기본적 측정 원리인 분산간섭계에 대해 이론적으로 분석하였고, 중심 파장 1550 nm, 대역폭 50 nm의 광학 시스템 구성으로 기초 실험을 통해 알고리즘의 검증 및 측정 영역을 확인하였다. 또한 기본적인 분산간섭계를 통해 다 채널 정밀 근접 거리 측정 시스템을 제안하였고 실험적으로 중심 파장 1550 nm, 대역폭 90 nm를 가진 SLD 광원을 이용하여, 시스템을 구현하고 측정 영역, 분해능, 반복능, 안정도를 평가하였다. 그 결과, 구성한 시스템에서 4 개의 측정 채널에서 1.4 mm의 측정 영역에서 1.9 nm수준의 분해능을 확인하였으며, 20 nm이하의 반복능으로 거리를 측정할 수 있었다. 또한 안정도 평가를 위해 15분 동안 고정된 거리를 측정한 결과 30 nm 이하의 안정도를 보이고 있음을 확인하였다. 이를 검증함에 1520~1680 nm대역, 0.3 nm분해능의 분광기로 동일하게 사용 되었다.

제안한 다 채널 센서에 대한 이론적, 실험적 검증 이후, 전체 시스템에 대한 시제품을 제작하였고, Matlab 프로그램을 기반으로 소프트웨어를 개발하였다. 시제품 제작이 완료된 후, 한국표준과학연구원에서 시제품에 대한 성능 평가 시험을 수행하였으며, 그 결과 본 연구에서 확인한 성능을 보이고 있음을 알 수 있었다.

[참고문헌]

- [1] F. Larramendy, L. Mazonq, P. Temple-Boyer, and L. Nicu, "Three-dimensional closed microfluidic channel fabrication by stepper projection single step lithography: the diabolito effect," *Lab on a Chip*, 12(2), 387-390 (2012).
- [2] ASML website (<http://www.asml.nl>)
- [3] A. Eftekhari, "Optical Delay Lines: Key to Time-Resolved Measurements," *PHOTONICS SPECTRA*, 48(12), 35-37 (2014).
- [4] R. D. Hughes, and J. T. Reese, "Proximity responsive capacitance sensitive method, system, and associated electrical circuitry for use in controlling mechanical and electro-mechanical equipment," U.S. Patent No. 5,081,406 (1992).
- [5] H. N. Guerrero, "Magnetic proximity sensor for measuring gap between opposed refiner plates," U.S. Patent No. 4,950,986 (1990).
- [6] J. Lee, Y.-J. Kim, K. Lee, S. Lee and S.-W. Kim, "Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses," *Nature Photonics*, 4(10), 716-720 (2010).
- [7] F. P. Kapron, and E. A. Thomas, "Fiber-optic reflection measurements using OCWR and OTDR techniques," *Lightwave Technology, Journal of*, 7(8), 1234-1241 (1989).
- [8] G. Binnig, C. F. Quate, and C. Gerber, "Atomic force microscope," *Physical review letters*, 56(9), 930 (1986).
- [9] S. S. Gorthi, and P. Rastogi, "Fringe projection techniques: whither we are?," *Optics and lasers in engineering*, 48, 133-140 (2010).
- [10] R. R. Donaldson et al., "Design and construction of a large, vertical axis diamond turning machine," *Proc. SPIE* 433, 62-67 (1983).
- [11] 주기남, "절대거리 측정을 위한 펨토초 레이저를 이용한 분산간섭계에 관한 연구", 박사학위논문, 한국과학기술원, (2007).

- [12] K. D. Froome et al., "Distance measurement by means of a light ray modulated at a microwave frequency," *J. Sci. Instrum.* 38, 458 (1961).
- [13] F. Bien et al., "Absolute distance measurements by variable wavelength interferometry," *Appl. Opt.* 20, 400-403 (1981).
- [14] C. Polhemus, "Two-wavelength interferometry," *Appl. Opt.* 12, 2071-2074 (1973).
- [15] G. Beheim et al., "Remote displacement measurements using a laser diode," *Electron. Lett.* 21, 93-94 (1985).
- [16] C. R. Tilford, "Analytical procedure for determining lengths from fractional fringes," *Appl. Opt.* 16, 1857-1860 (1977).
- [17] P. A. Flournoy et al., "White-light interferometric thickness gauge," *Appl. Opt.* 11, 1907-1915 (1972).
- [18] U. Schnell et al., "Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the target," *Opt. Lett.* 21, 528-530 (1996).
- [19] U. Schnell et al., "Absolute distance measurement with synchronously sampled white-light channeled spectrum interferometry," *Pure Appl. Opt.* 4, 643 (1995).
- [20] K. -N. Joo and S. -W. Kim, "Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser," *Opt. Express* 14, 5954-5960 (2006).
- [21] K.-N. Joo, Y. Kim, and S. -W. Kim, "Distance measurements by combined method based on a femtosecond pulse laser," *Opt. Express* 16, 19799-19806(2008).
- [22] M. Takeda et al., "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *J. Opt. Soc. Am.* 72, 156-160 (1982).
- [23] K.-N. Joo, "Dichroic spectrally-resolved interferometry to overcome the measuring range limit," *Meas. Sci. Technol.* 26, 095204 (2015).

이 력 서

성 명 : 김 병 권 (金 炳 權)

생 년 월 일 : 1989년 9월 18일(양력)

출 생 지 : 광 주

주 소 : 광주광역시 동구 소태동 모아미래도 @ 102동 1306호

학 력

2003.3. - 2006.2. 조선대학교 부속고등학교

2008.3. - 2014.2. 조선대학교 광기술공학과 학사과정

2014.3. - 2016.2. 조선대학교 광기술공학과 석사과정

학위 논문

- [1] “분산간섭계 원리를 이용한 다 채널 광학 깎 센서에 관한 연구,” 석사학위논문, 조선대학교 (2016).

학술지 게재 논문

- [1] 김병권, 주기남, “Seed 레이저용 정상분산 영역에서 발진하는 간단한 구조의 이터븀 기반 모드 잠금 광섬유 레이저,” 한국정밀공학회지, 제31권, 제9호, pp.805-811
- [2] Byeong Kwon Kim and Ki-Nam Joo, “Multi-channel fiber optic proximity sensor,” Meas. Sci. Technol., submitted.

국내·외 학회 발표

- [1] Byeong Kwon Kim, Ho-Jae Lee, and Ki-Nam Joo, "Development of a Simple Mode-Locked Yb-Doped Fiber Laser Under Normal Dispersion," CLEO-PR & OECC/PS (2013).
- [2] 김병권, 주기남, "정상 분산 영역에서 발진하는 모드잠금 이터븀 광섬유 레이저," 한국광학회 2013 년도 하계학술발표회.
- [3] 김병권, 주기남, "광섬유만으로 구성된 간단한 구조의 모드잠금 이터븀 레이저 개발," 한국광학회 2014 년도 하계학술발표회.
- [4] Byeong Kwon Kim and Ki-Nam Joo, "Low coherence interferometric application using a frequency modulated laser diode," ICPT (2014).
- [5] Ki-Nam Joo, Byeong Kwon Kim and Yong Bum Seo, "Multi-Channel Optical Gap Sensor Based on Spectrally-Resolved Interferometry," The 5th Asia Pacific Optical Sensors Conference APOS (2015).
- [6] Yong Bum Seo, Byeong Kwon Kim and Ki-Nam Joo, "Dual spectrally-resolved interferometry to improve measurement range," SPIE Optical Metrology (2015).
- [7] 김병권, 주기남, "다중 채널 광 갭 센서 개발," 한국광학회 2015 년도 하계 학술발표회.