

PID 제어를 이용한 파장 스위핑 레이저의 스위핑 선형화

엄진섭⁺

Sweeping Linearization of Wavelength Swept Laser using PID Control

Jinseob Eom⁺

Abstract

In this study, a PID control method for sweeping automatic linearization of a wavelength swept laser is proposed. First, the closed-loop transfer function embodying the PID control is derived. Through the simulation of the function, $K_p = 0.022$, $K_i = 0.008$, $K_d = 0.002$ were obtained as the best PID coefficients for fast linear sweeping. The performance test using the PID coefficients showed that linear sweeping was held up well with a 98.7% decrement in nonlinearity after the 10th feedback, and 45 nm sweeping range, 1 kHz sweeping frequency, and 8.8 mW average optical power were obtained. The equipment consists of a fiber Bragg grating array, an optical-electronic conversion circuit, and a LabVIEW FPGA program. Every 5s, automatic feedback and PID control generate a new compensated waveform and produce a better linear sweeping than before. Compared with nonlinear sweeping, linear sweeping can reduce the cumbersome and time-consuming recalibration processes and produce more accurate measurement results.

Keywords: Linear sweeping, PID control, Wavelength swept laser, Fiber Bragg grating array, FFP-TF

1. 서 론

인류사에 있어서 자연재해, 인재, 그리고 노화 등으로 인하여 교량, 댐, 터널 등과 같은 대형 SOC 구조물의 붕괴 사고가 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 붕괴 사고는 인명 피해는 물론 많은 사회적, 경제적 손실을 동반한다. 따라서 이러한 붕괴 사고는 사전에 미리 위험성을 발견하여 대처하는 것이 가장 최선의 대책이다. 오늘날은 이러한 예방을 목적으로 대형 SOC 구조물을 건설할 때에 구조물 안전 모니터링 시스템을 함께 설치하는 것이 법으로 규정되어 있다. 모니터링을 위하여 여러가지 방식이 사용되어 왔지만 파장 스위핑 레이저(Wavelength Swept Laser) 및 광섬유 격자(FBG: Fiber Bragg Grating) 센서를 사용하는 광학 방식[1-3]이 품질의 우수성 및 유지보수의 편리성 때문에 기존의 전자 시스템을 대체해 나가고 있다.

파장 스위핑 레이저를 광원으로 사용하는 모니터링 시스템에

서 전체 성능에 가장 많은 영향을 미치는 사항은 레이저의 스위핑 특성이다. 요구되는 스위핑 특성으로는 광대역성, 고속성, 평탄성, 그리고 선형성 등이 있다. 고속 광대역 특성은 설치 가능한 센서의 개수 및 모니터링 빈도를 증가시킨다. 평탄성은 스위핑 전 구간에 걸쳐 출력 광 파워가 균일한 정도를 나타내며 그렇지 못한 경우 측정 누락을 야기시킬 수 있다. 한편 구조물에 미치는 응력을 더욱 정확하게 측정하기 위해서는 레이저의 발진 파장이 시간에 대해 직선으로 증가 또는 감소하는 스위핑의 선형성이 요구된다.

파장 스위핑 레이저의 스위핑은 주요 구성품인 광섬유 페브리 페롯 파장 가변 필터(FFP-TF: Fiber Fabry-Perot Tunable Filter)의 투과 대역을 가변 시켜 얻어진다. 즉 FFP-TF를 구성하는 압전소자(PZT: Piezoelectric Transducer)에 주기적인 전압 파형을 인가하여 미러 간 공진 간격을 변화시킴으로써 투과 대역을 주기적으로 변동시킨다. 그러나 압전소자는 일반적으로 동일한 전압 파형을 인가하여도 온도 및 사용 연수에 따라 동작 특성이 다소 변화되는 경향이 있다. 이는 레이저에 영향을 주어 레이저의 스위핑 특성 역시 계절 및 사용 연수에 따라 변할 수 있다. 또한 레이저의 사용이 장시간 지속되는 경우에도 주변 환경의 변화로 인하여 스위핑 특성이 사용 초기와 달라질 수 있다. 이러한 점은 항상 일정한 스위핑 특성이 요구되는 파장 스위핑 레이저에서 필히 해결되어야 한다.

이를 해결하기 위한 한가지 방법으로서 모니터링 측정이 수행될 때마다 레이저의 비선형 스위핑 특성도 함께 측정한 후에

¹ 강원대학교 전자공학과 (Department of Electronics Engineering, Kangwon National University)

1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Kangwon-do 24341, Korea

⁺Corresponding author: jeom@kangwon.ac.kr

(Received: Oct. 20, 2020, Accepted: Oct. 29, 2020)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

보정 과정을 통하여 올바른 모니터링 결과를 얻고 있다[4]. 또는 인가 파형으로서 근사 삼각파를 사용하여 부족한 대로 유사 선형 스위핑을 그대로 사용하고 있다. 그러나 이러한 스위핑 특성 변동 문제에 대한 최선의 해결책은 파장 스위핑 레이저가 언제 어디서나 선형 스위핑을 유지하도록 자동 제어하는 것이다. 항상 선형 스위핑이 유지되면 비선형 스위핑 특성을 매번 측정 한 후에 보정 과정에서 다시 사용하여야 하는 번거로움이 없어진다. 그리고 모니터링 측정 값을 바탕으로 구조물에 가해지고 있는 응력을 계산하는 과정이 단순 해지며 더 정확한 결과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 1550 nm 대역의 반도체 광 증폭기(SOA : Semiconductor Optical Amplifier), FFP-TF, 그리고 편광 조절기(PC : Polarization Controller)를 이용하여 파장 스위핑 링 레이저를 제작하였다. 이는 1 kHz의 왕복 스위핑 속도와 8.8 mW의 평균 출력 광 파워, 그리고 약 45 nm의 스위핑 범위를 나타내었다. 또한 레이저의 스위핑 전달함수를 구축하고 이의 시뮬레이션을 통하여 스위핑 선형화에 최적인 PID(Proportional Integral Derivation) 계수를 도출하였다. 그리고 도출된 계수를 이용한 PID 제어를 통하여 FFP-TF 인가 파형을 보정하였으며 약 회의 보정 후부터는 우수한 선형 스위핑 특성이 얻어 짐을 확인하였다.

2. 스위핑 선형화를 위한 PID 계수 도출

2.1 파장 스위핑 레이저 구성 및 동작원리

본 논문에서 구현된 파장 스위핑 레이저의 구성을 Fig. 1에 보았다[5]. 이는 1550 nm를 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 중심파장으로 가지는 SOA, 이의 양쪽에 위치한 광 아이솔레이터(Optical Isolator), 레이저 광 출력을 위한 1×2 광 커플러(Optical

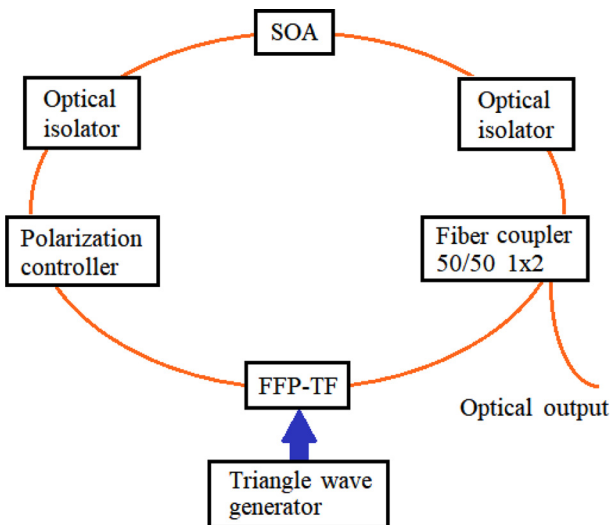


Fig. 1. Schematic diagram of realized wavelength swept laser.

Coupler), 스위핑을 위한 FFP-TF, 스위핑 평탄성 제어를 위한 편광조절기 등이 차례로 연결된 광섬유 링 공진기 구조를 가진다.

레이저의 동작원리는 다음과 같다[5-6]. SOA로부터 출력된 ASE 광은 2개의 광 아이솔레이터 때문에 링 공진기를 시계방향으로 회전한다. 광이 광섬유 링 공진기를 1회전하는데 소요되는 시간은 FFP-TF에 인가되는 신호 전압의 변동 시간에 비하여 매우 짧다. 이는 임의의 시점에 FFP-TF의 투과 대역을 통과한 ASE 광의 일부가 링 공진기를 1회전 주행한 후 다시 FFP-TF에 도착하여도 FFP-TF의 투과 대역은 여전히 이전과 같음을 의미한다. 따라서 FFP-TF의 투과 대역이 다음 값으로 변경되기 전에 ASE 광의 일부는 링 공진기를 여러 번 회전할 수 있고 SOA를 통과할 때마다 매번 증폭된다. 이의 결과로 레이저는 FFP-TF의 투과 대역과 동일한 파장으로 순간 발진하게 된다. 이제 FFP-TF의 투과 대역이 다른 값으로 변경되면 위와 동일한 과정을 거쳐 레이저는 변경된 투과 대역의 파장으로 순간 발진하게 된다. 이제 FFP-TF에 삼각파와 같은 주기적인 전압 파형을 인가하여 투과 대역을 주기적으로 변동시키면 동일한 주기를 가지는 레이저의 파장 스위핑이 얻어진다. SOA의 ASE 전체 대역을 모두 활용할 수 있는 한도 내에서 신호 전압의 크기를 증가시키면 광대역에 걸친 파장 스위핑을 얻을 수 있다.

위의 레이저 구성에 사용된 FFP-TF의 구조를 Fig. 2에 나타내었다. FFP-TF는 일정 간격의 공기 층을 사이에 두고 서로 마주 보는 2개의 광섬유 단면으로 이루어진 페브리-페롯 간섭계 구조[7]를 가진다. 각 단면에는 미러(mirror)가 설치되어 있으며 간섭계의 간격을 조정할 수 있도록 한쪽 미러에는 압전소자(PZT: Piezoelectric Transducer)가 부착된다. 이 압전소자에 주기적인 전압 파형을 인가하여 미러 간 공진 간격을 변화시킴으로써 투과 대역을 주기적으로 변동시킨다. 본 논문에서는 투과 대역을 세팅된 스위핑 중심 파장으로 이동시키기 위한 직류 전압에 스위핑을 위한 1 kHz 삼각파 전압이 합해진 파형을 FFP-TF에 인가하였다. 이 경우에 삼각파 1주기 동안에 파장 증가 스위핑과 파장 감소 스위핑 즉 한번의 왕복 스위핑이 얻어진다. 사용된 FFP-TF는 FSR(Free Spectral Range) 120 nm, Finesse 600, 삽입 손실 2.5 dB, -10~50 V의 인가 전압 범위를 가진다.

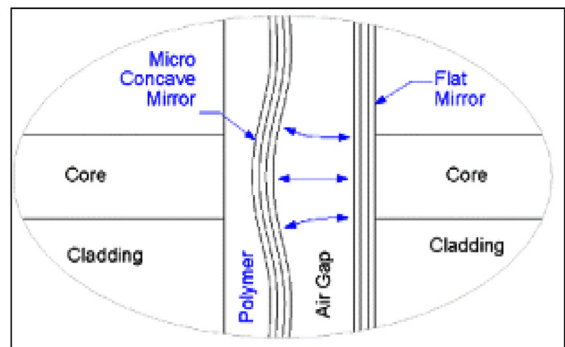


Fig. 2. Cavity structure of FFP-TF.

2.2 스위핑 선형화 장치 구성 및 PID 계수 도출

대형 SOC 구조물 안전 모니터링[8]에 사용되는 파장 스위핑 레이저는 보통 1 kHz의 주파수로 스위핑 된다. 한편 시간에 따른 스위핑의 특성은 일반적으로 비선형적이다. 이러한 비선형 스위핑 특성을 선형 스위핑 특성으로 변화시키면 구조물에 설치된 FBG 센서의 반사 파장을 계산하는 것이 간단해지고 더욱 정확해질 수 있다. 그러나 레이저가 선형으로 스위핑 되도록 FFP-TF에 인가되는 전압 파형을 잘 선택하였다 할지라도 여전히 문제가 남는다. 즉 레이저를 장시간 사용하면 FFP-TF의 동작 특성 변동으로 인하여 레이저가 다시 비선형으로 동작할 가능성이 있다. 따라서 레이저의 선형 스위핑이 장시간 유지되기 위해서는 인가 파형 보정 작업이 주기적으로 계속 수행되어야 한다. 본 논문에서는 PID 제어 방식을 사용하여 FFP-TF에 인가되는 전압 파형을 주기적으로 자동 보정함으로써 선형성을 장시간 유지하는 방법을 제안하였고 이를 위한 장치를 구현하였다.

2.2.1 장치 구성도

Fig. 3은 본 논문에서 구현된 스위핑 자동 선형화 장치의 구성을 보여준다. FPGA 임베디드 모듈(본 실험에서는 NI cRIO-9063을 사용)로부터 생성된 삼각파가 파장 스위핑 레이저를 구성하는 FFP-TF에 인가되면 레이저로부터는 스위핑된 광 출력을 얻을 수 있다. 1×2 광섬유 커플러를 통하여 외부로 분기되는 광 출력은 광 서큘레이터를 통하여 특별 제작된 광섬유 격자 열(FBG array)에 입사된다. 이 FBG array는 광섬유 코어에 2 cm 간격으로 반사 파장 값이 점점 커지는 순서로 FBG를 제작한 것이며, 이웃한 두 FBG 간의 반사 파장 값 차이는 $\delta\lambda = 1 \text{ nm}$ 로서 FBG array 전체에 걸쳐 동일하다. FBG는 광섬유 코어의 길이 약 1 cm 에 걸쳐 주기적인 굴절률 변화가 생기도록 제작되며 주기가 1인 경우 $\lambda = 2n_1d$ 에 해당하는 파장을 반사시킨다 [9]. 여기서 n 은 코어의 굴절률이다. 실험에서는 43(1528~1570 nm) 개의 FBG가 제작된 FBG array를 사용하였다. 레이저의 스위핑 상태에서 FBG array내의 각 FBG로부터 반사된 광은 시간상으로 광 펄스 열(array) 형태를 취한다. 각 광 펄스는 다시 광 서큘레이터를 거쳐 순차적으로 광전 변환 회로의 포토다이오드에 입사되며 최종적으로 왕복 스위핑당 86(= 43 × 2)개의 디지털 펄스 열로 변환된다. 레이저의 스위핑이 선형적일 경우에는 광전 변환 회로에서 일정한 시간 간격의 디지털 펄스 열이 출력되지만, 스위핑이 비선형일 경우에는 간격이 서로 다른 디지털 펄스 열이 출력될 것이다. 이 디지털 펄스들은 데이터 획득(DAQ: Data Acquisition) 모듈에서 샘플링 되어 cRIO-9063으로 전송된다. cRIO-9063에서는 각 디지털 펄스의 중앙에 해당하는 시간 정보를 확보하고 이 정보로부터 레이저의 현재 스위핑 상태를 파악하며 제안된 PID 제어 방식 알고리즘을 통하여 새로운 보정 파형을 생성한다. 이 보정 파형은 DAQ 모듈을 통하여 다시 FFP-TF에 인가된다. 이러한 과정은 5sec 주기로 반복되어 궁극

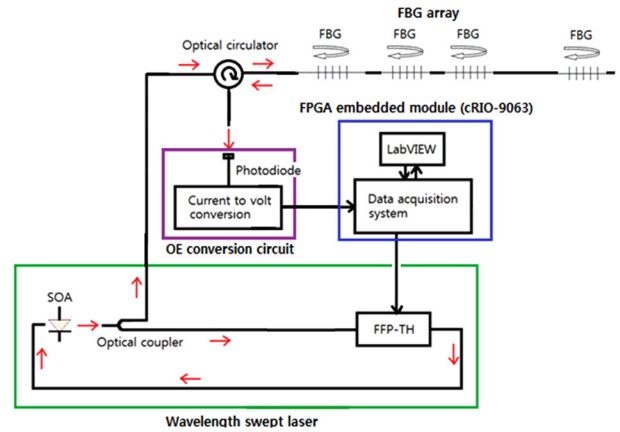


Fig. 3. Block diagram of sweeping automatic linearization equipment.

적으로 선형 스위핑이 자동 유지된다.

FFP-TF에 삼각파 또는 새로운 보정 파형을 인가하기 위한 DAQ 모듈로서 NI사의 NI-9262를 사용하였다. NI-9262는 아날로그 출력(AO: Analog Output)을 위한 모듈로서 cRIO-9063에 장착되어 사용된다. 이는 cRIO-9063에서 보내는 16 bit 디지털 데이터를 아날로그 신호로 변환(DAC) 하며 출력 전압 범위는 ±10V 이다. 실험에서 사용된 출력 속도는 500 ks/s 이다. 출력된 아날로그 신호는 자체 제작된 드라이버 회로를 통하여 FFP-TF를 구동시킨다.

광전 변환 회로에서 출력되는 디지털 전압 펄스를 샘플링 하기 위한 DAQ 모듈로서 NI사의 NI-9401을 사용하였다. NI-9401은 디지털 입출력(DIO: Digital Input/Output)을 수행하며 cRIO-9063에 장착되어 사용된다. 이는 40 MHz 클럭을 사용하여 입력된 디지털 펄스를 샘플링하며 이 값을 cRIO-9063으로 전송한다. cRIO-9063은 667 MHz의 ARM Cortex-A9 듀얼 프로세서와 Zynq-7000 FPGA로 구성된다.

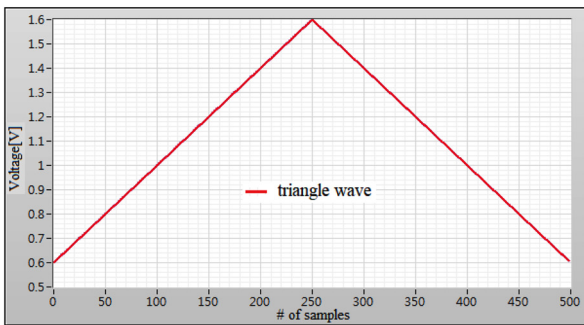
2.2.2 전달함수 구축

PID 제어 방식을 사용하는 스위핑 자동 선형화 장치의 폐루프(Closed-loop) 전달함수를 구하기 위해서는 우선 FFP-TF드라이버 회로에 인가 파형이 입력되었을 때부터 레이저의 스위핑 상태를 출력해주는 부분까지의 개루프(Open-loop) 전달함수 $G(s)$ 를 확보하여야 한다. 이를 위하여 삼각파를 FFP-TF드라이버 회로에 인가하고 이에 해당하는 출력 스위핑 상태를 측정하였다.

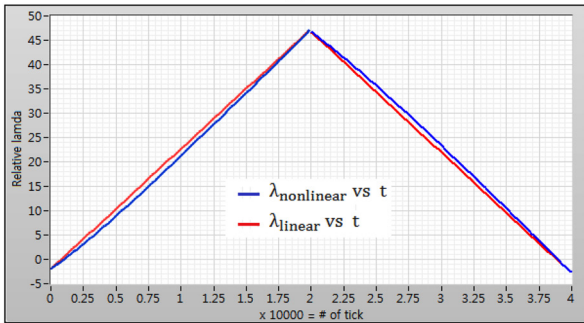
Fig. 4(a)의 전압 파형은 스위핑을 야기시키기 위하여 FFP-TF 드라이버 회로에 인가된 삼각파의 1 주기를 나타낸다. 삼각파의 크기는 $1V_{p-p}$, 주파수는 1 kHz이며 삼각파의 1 주기를 구성하는 샘플 데이터의 개수는 500개이다. 이는 삼각파를 생성하는 아날로그 출력 DAQ 모듈의 데이터 출력 속도가 500 KS/s이기 때문이다. 그림에서 삼각파의 평균치가 0.5가 아닌 이유는 스위핑

중심 파장을 원하는 값에 맞추기 위해 삼각파에 직류 전압을 더 하였기 때문이다.

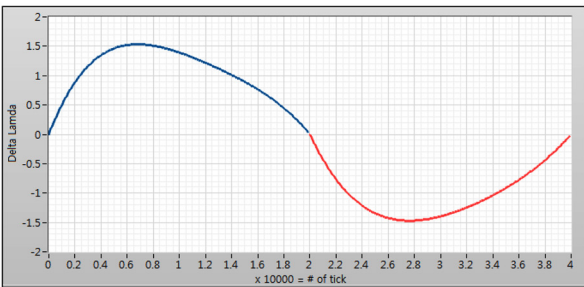
Fig. 4(b)는 측정된 $\lambda_{\text{nonlinear}}$ 대 t의 그래프와 이로부터 계산된 λ_{linear} 대 t의 그래프를 함께 보여준다. $\lambda_{\text{nonlinear}}$ 대 t에서 왼쪽 상승 그래프의 x좌표는 트리거 신호의 상승 에지부터 FBG array로부터 반사되는 각 디지털 펄스의 중앙시점까지 측정된 시간이며 y좌표는 트리거 신호의 상승 에지 후부터 하강 에지 전까지 디지털 펄스가 들어올 때마다 0부터 시작하여 1씩 증가시키면서 카운트한 값이다. 오른쪽 하강 그래프에서 y좌표는 트리거 신호의 하강 에지 후부터 상승 에지 전까지 디지털 펄스가 들어올 때마다 왼쪽 상승 그래프의 마지막 값부터 시작하여 1씩 감소시키면서 카운트한 값이다. 위에서 얻어진 좌표값들을 기반으로 왼쪽과 오른쪽 구간에 대해 각각 별도로 다항식 피팅을 적용하여 전체 500개의 점으로 이루어진 $\lambda_{\text{nonlinear}}$ 대 t의 그래프를 얻었다. x축에 표시된 틱(tick)은 NI-9401의 디지털 I/O클럭 주



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Measurements for open-loop system with triangle wave input; (a) triangle wave vs t, (b) λ vs t, (c) $\Delta\lambda (= \lambda_{\text{linear}} - \lambda_{\text{nonlinear}})$ vs t.

기이며 이다. 따라서 40000 tick = 1 ms 이다. 청색 곡선은 $\lambda_{\text{nonlinear}}$ 대 t의 그래프이며 적색 직선은 이들의 양 끝점을 직선으로 연결한 λ_{linear} 대 t의 그래프를 나타낸다. Fig. 4(c)는 이들 간의 차이인 $\Delta\lambda (= \lambda_{\text{linear}} - \lambda_{\text{nonlinear}})$ 대 t의 그래프를 보여준다. 그림으로부터 장치에 사용된 FFP-TF의 경우에는 삼각파 인가 시에 증가/감소 방향 스위핑의 약 1/3 지점에서 비선형 스위핑이 가장 커짐을 알 수 있다. 측정된 최대값은 $\Delta\lambda_{\text{max}} = 1.55[\text{nm}]$ 이었다.

Fig. 4(c)에서 $\Delta\lambda (= \lambda_{\text{linear}} - \lambda_{\text{nonlinear}})$ 대 t 그래프의 왼쪽 구간(청색)과 오른쪽 구간(적색)은 부호가 서로 다르지만 비슷한 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 그리고 실제로 각 구간에 대한 별도의 선형 스위핑 시뮬레이션을 통하여 2구간에서 동일한 PID 계수가 얻어 짐을 확인하였다. 따라서 PID 계수 도출을 위한 시뮬레이션에서는 입력과 출력 파형의 전체 구간이 필요하지 않고 단지 왼쪽 구간만을 살펴 보는 것만으로도 충분하다는 것을 알 수 있다. 왼쪽 구간은 입력인 삼각파에서는 증가 부분에 해당하고 출력인 스위핑에서는 단파장에서 장파장으로 증가하는 구간에 해당한다.

인가 파형 입력 부분부터 레이저의 스위핑 상태를 출력하는 부분까지의 개루프 전달함수를 $G(s)$ 라고 할 때 삼각파 왼쪽 구간 파형에 대한 $\lambda_{\text{nonlinear}}$ 대 t의 그래프의 왼쪽 구간 파형을 Fig. 5에 나타내었다. 즉 개루프 전달함수 $G(s)$ 에 삼각파의 증가 부분에 해당하는 입력이 주어질 때 출력으로서는 포물선 형태의 비선형 스위핑이 얻어 짐을 보여준다. 그리고 Fig. 5에서는 동일한 파형이 주기 T를 가지고 반복되는 것으로 설정하였다. 이는 PID 계수를 도출하는 페루프 시뮬레이션에서 주기 T 간격으로 피드백이 이루어지기 때문이다.

개루프 전달함수 $G(s)$ 를 구하기 위해서는 먼저 첫번째 T 구간에서의 입력 파형 방정식과 출력 파형 방정식이 필요하다. 특히 출력 파형은 비선형이므로 다항식 피팅을 사용하여 4차수까지 구하였으며 방정식은 $\lambda_{\text{nonlinear}}(t) = 17.74t + 9.77t^2 - 5.38t^3 + 1.1t^4$, $0 \leq t < T$ 로 주어진다. 이때 각 차수의 계수가 표기되기 쉬운 적절한 값을 가지도록 $T=2$ 로 세팅하였다. 이 값을 뒤 부분에서 언급되는 페루프 시뮬레이션 과정과 실제 PID 제어 실험 과정에서 동일하게 사용되었다. 확보된 입력과 출력의 방정식을 바탕으로 LabVIEW Control Design & Simulation 을 이용하여 개루프 전달함수 $G(s)$ 를 계산하였다.

일반적으로 PID 제어[10]는 피드백과 함께 사용되어 시스템

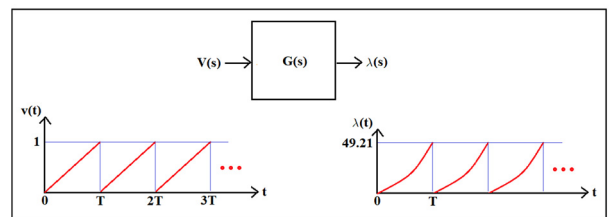


Fig. 5. Open-loop transfer function of sweeping automatic linearization equipment without PID control and feedback.

의 출력(온도, 속도, 광 파워 등)이 원하는 목표치(set point)에 빠르고 정확하게 도달하게 하고 이후부터는 이 목표치를 계속 유지하게 한다. 이는 비례(Proportional)항과 적분(Integral)항 그리고 미분(Derivative)항의 합으로 구성되며 목표치와 출력값의 차(즉 에러(error))를 입력으로 받는다. 입력된 에러에 대하여 3 개 항의 각 계수 크기에 따른 역할을 통하여 다음 출력값이 결정되고 이러한 과정의 반복을 통하여 출력값은 목표치로 수렴하게 된다.

이제 Fig. 5에 PID 제어를 포함시키고 피드백을 추가한 페루프 전달함수를 도식화하면 Fig. 6과 같다. 여기서 $K_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$ 로 주어진다. K_p 는 비례항의 계수, K_i 는 적분항의 계수이며 K_d 는 미분항의 계수를 나타낸다. Fig. 6(a)에서 $R(s)$ 는 Fig. 6(b)에 보여진 $r(t)$ 그래프의 라플라스 변환이다. $r(t)$ 는 목표로 하는 선형 스위핑을 나타낸다. y 축은 시간에 따른 상대적인 파장값을 나타내며 파장이 증가하는 방향으로 선형 스위핑되어서 최종 파장이 처음 파장보다 49.21 nm 만큼 더 큼을 보여준다. 그리고 이 파형은 목표 파형이므로 주기 T 마다 반복된다. Fig. 6(b)의 첫번째 T 구간에서 $r(t)=0$ 이고 대신에 삼각파와 $v_o(t)$ 가 주어졌 것은 맨 처음에 FFP-TF에 삼각파가 인가된 경우를 나타내기 위함이다. 이때 전달함수 $G(s)$ 로부터

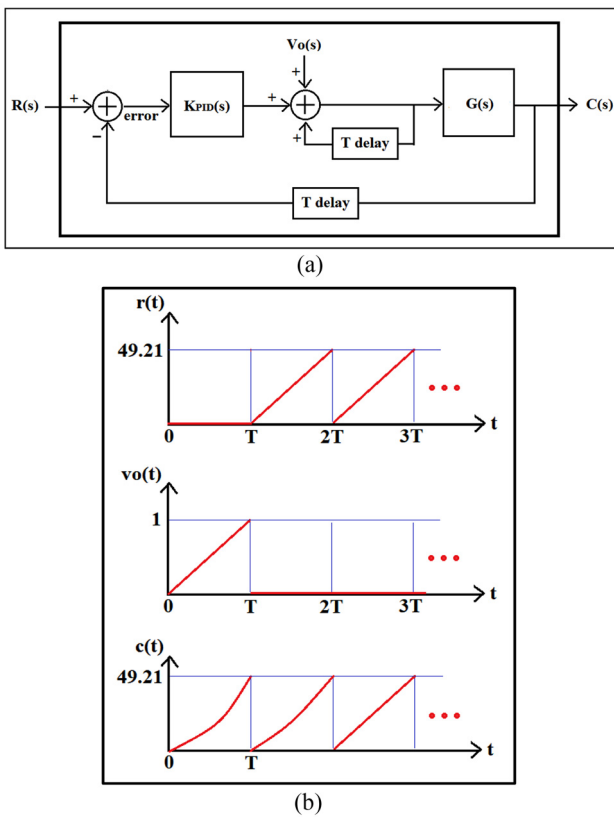


Fig. 6. Closed-loop transfer function of sweeping automatic linearization equipment with PID control and feedback ; (a) Block diagram of transfer function, (b) waveforms at each port of transfer function.

는 $c(t)$ 의 첫번째 T 구간에서 보여지는 비선형 스위핑이 출력될 것이다. 이 비선형 스위핑 그래프는 시간 T 만큼 지연된 상태로 피드백 되어 $r(t)$ 의 두번째 구간($T \leq t < 2T$)에서 보여진 목표치 선형 스위핑 그래프와의 차(즉 에러) 그래프가 계산된다. 그리고 이는 PID 제어를 위해 $K_{PID}(s)$ 로 입력된다. $K_{PID}(s)$ 의 출력은 바로 이전 구간($0 \leq t < T$)의 인가 파형(이 경우는 $v_o(t)$)와 더해져서 새로운 보정 파형($T \leq t < 2T$)이 생성된다. 새 보정 파형은 전달함수 $G(s)$ 에 입력되고 새로운 스위핑 파형 $c(t)$ ($T \leq t < 2T$)가 얻어진다. 위의 과정이 주기 T 마다 반복되어 궁극적으로는 목표 파형인 $r(t)$ 처럼 선형화된 스위핑을 얻을 수 있으며 계속되는 PID 제어를 통하여 이 상태를 계속 유지시킬 수 있다.

2.2.3 PID 계수 도출

Fig. 6(a)의 페루프 전달함수에 Fig. 6(b)의 $r(t)$ 와 $v_o(t)$ 를 적용하여 주기T 간격으로 스위핑 파형 $c(t)$ 및 에러 $e(t)$ 를 계산하는 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서 에러 $e(t)$ 는 예를 들면,

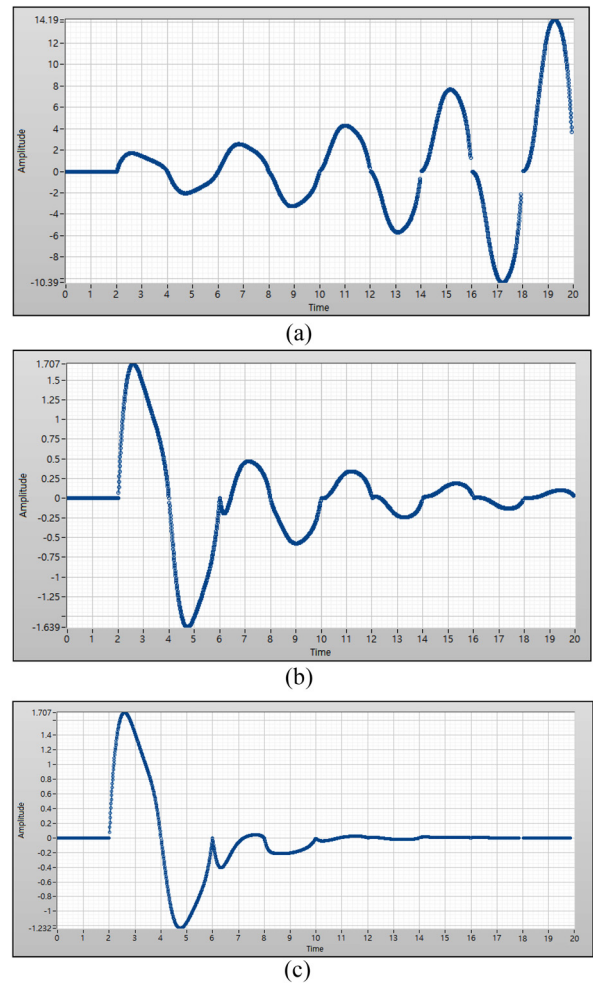


Fig. 7. Error $e(t)$ graphs from simulations using different PID coefficients ; (a) $K_p = 0.05, K_i = 0.01, K_d = 0.005$, (b) $K_p = 0.022, K_i = 0.01, K_d = 0.005$, (c) $K_p = 0.022, K_i = 0.008, K_d = 0.002$.

$e(t) = r(t)(T \leq t < 2T) - c(t)(0 \leq t < T)$ 으로 주어지며, 이 값이 0에 근접할 수록 스위핑 선형화가 잘 이루어지고 있음을 의미한다. 이 시뮬레이션은 PID 계수 K_p , K_i , K_d 값을 변수로 하고 $T=2$ 를 사용하여 진행되었으며 LabVIEW Control Design & Simulation을 이용하였다.

Fig. 7은 서로 다른 PID 계수를 사용하여 얻어진 에러 $e(t)$ 그래프들을 보여준다. 이들은 미흡 감쇠(Underdamping)된 특성을 보이고 있으며 스위핑 선형화와 관련된 변수로는 퍼센트 오버슈트(Persent Overshoot, %OS)와 정착 시간(Settling Time, T_s)가 있다[11]. %OS는 $2T \leq t < 3T$ 구간에서의 최대값을 $T \leq t < 2T$ 구간에서의 최대값으로 나눈 값을 퍼센트로 표시한 값이다. T_s 는 과도 상태가 진동하면서 감소되어 갈 때 어느 구간의 최대값이 $T \leq t < 2T$ 구간 최대값의 $\pm 2\%$ 이내로 진입하기 시작할 때까지의 누적 시간을 의미한다.

스위핑 선형화 과정에서 %OS가 크다는 것은 $T \leq t < 2T$ 구간에서 사용된 인가 파형이 과도하게 보정 되었음을 의미한다. %OS가 100%를 초과하면 Fig. 7(a)에서 보이는 것처럼 에러가 점점 증가하여 발진하게 된다. Fig. 7을 전체적으로 살펴 보면 %OS가 작을수록 T_s 도 작아지는 경향이 있음을 알 수 있다. T_s 가 작다는 것은 에러가 빠르게 0에 근접하는 것을 나타낸다. 따라서 빠른 시간 내에 스위핑 선형화를 확보하기 위해서는 %OS 값이 점점 작아지는 방향으로 PID 계수를 조정해 나가야 한다. 많은 시뮬레이션을 통하여 $K_p = 0.022$, $K_i = 0.008$, $K_d = 0.002$ 의 경우가 가장 좋은 결과를 나타내었으며 이때의 에러 $e(t)$ 의 그래프를 Fig. 7(c)에 보였다. 그림에서 약 8번의 피드백(또는 인가 파형 보정) 시점부터 전체 T 구간에 걸쳐 에러가 0에 근접하는 것을 알 수 있다. 그리고 이 경우에 대하여 피드백 진행에 따른 스위핑 상태 $c(t)$ 를 Fig. 8에 나타내었다. 피드백이 진행될수록 빠르게 선형화가 진행됨을 알 수 있다.

이로부터 Fig. 6(a)의 전달함수 체계에 따른 장치 구성 및 시뮬레이션을 통하여 도출된 PID 계수 $K_p = 0.022$, $K_i = 0.008$, $K_d = 0.002$ 를 사용하면 약 10번의 인가 파형 보정 후부터는 신뢰할 만한 스위핑 선형화가 얻어질 수 있음을 알 수 있다.

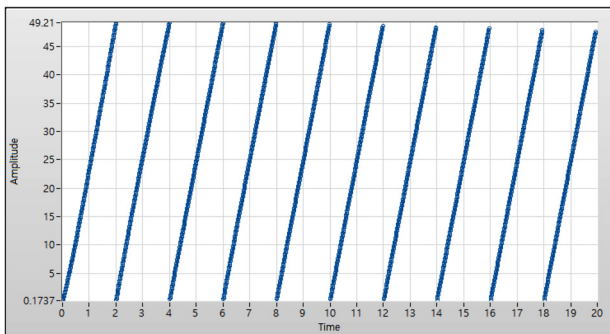


Fig. 8. Phased sweeping status in case of $K_p = 0.022$, $K_i = 0.008$, $K_d = 0.002$.

3. 실험 결과 및 검토

스위핑 자동 선형화를 위한 실험 셋업을 Fig. 9에 보였다. 원래 플라스틱 상자의 내부는 2개의 층으로 구성된다. 하층에는 파장 스위핑 레이저의 광학부 및 SOA드라이버 회로가 설치되어 있고, 상층에는 cRIO-9063과 DAQ 모듈, FBG array, 그리고 기타 드라이버 회로 등이 놓여 있다. 그러나 그림에서 보여진 플라스틱 상자 안에는 하층만이 놓여 있으며 상층은 상자의 바깥쪽에 분리시켜 놓았다. 하층 왼쪽의 검은색 박스는 SOA 및 이의 드라이버 회로이며, 아래쪽의 소형 검은색 박스는 편광조절기이고, 오른쪽의 소형 흰색 박스는 FFP-TF이다. 상층 중앙에는 FFP-TF와 편광조절기의 드라이버 회로가 놓여있고 오른쪽 상단에는 cRIO-9063과 DAQ 모듈이 놓여 있다. 상층 왼쪽 하단에 위치한 청색 고리는 FBG array이다.

시뮬레이션에서 도출된 PID 계수 $K_p = 0.022$, $K_i = 0.008$, $K_d = 0.002$ 를 적용하여 스위핑 선형화 실험을 수행하였다. 인가 파형 1주기는 500개의 샘플 데이터로 구성되며 각 샘플 데이터마다 PID 제어가 별도로 수행된다. 따라서 새로운 인가 파형이 생성되기 위해서는 총 500번의 PID 제어가 요구된다. 인가 파형은 약간의 여유를 두어 5 sec 주기로 보정 되도록 하였다. 실험 결과로서 FFP-TF에 맨 처음 인가된 삼각파와 10번째 피드백 후에 생성된 보정 파형을 Fig. 10에서 서로 비교하였다. 그림에서 청색 직선은 레이저 ON 직후에 FFP-TF에 인가된 삼각파의 1 주기를 보여주며 500개의 데이터로 구성된다. 그림에서 보여진 $1V_{pp}$ 의 삼각파 또는 보정파는 NI-9262로부터 출력되어 자체 제작된 드라이버 회로에서 증폭 된 후에 FFP-TF를 구동시킨다. 파형의 증가 부분은 단파장에서 장파장으로 스위핑하는 구간에 해당되고, 감소 부분은 역으로 스위핑하는 구간에 해당

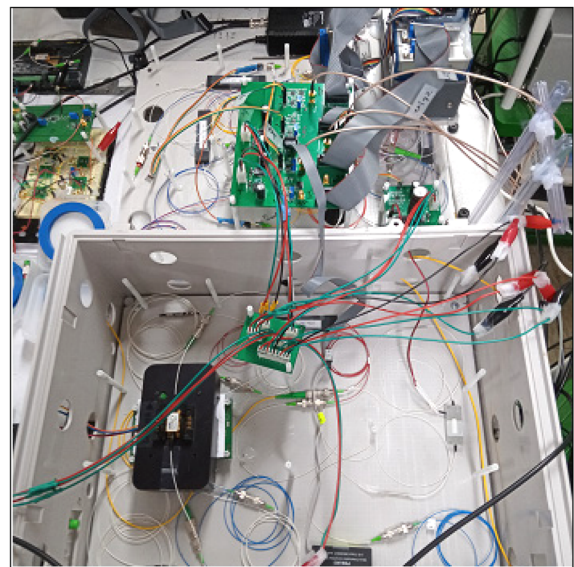


Fig. 9. Experimental set-up for sweeping automatic linearization.

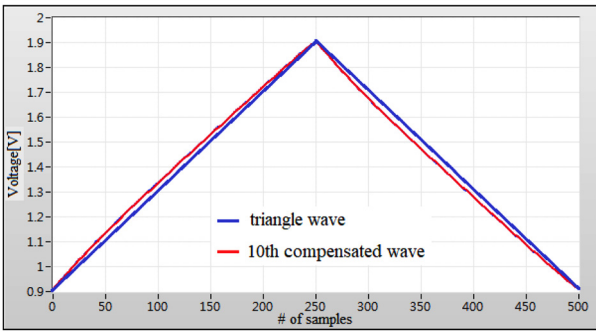


Fig. 10. Comparison between triangle wave and 10th compensated wave.

된다. 그림에서 적색 곡선은 10번째 생성된 보정 파형을 나타낸다. 두 파형의 차이는 비록 작은 것 같지만 스위핑 특성에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

10번째 보정 파형이 FFP-TF에 인가되었을 때 측정된 $\lambda_{\text{nonlinear}}$ 대 t 의 그래프와 이로부터 계산된 λ_{linear} 대 t 의 그래프를 Fig. 11(a)에 나타내었다. y축에 표시된 숫자는 상대적인 파장 값을 나타낸다. 청색은 $\lambda_{\text{nonlinear}}$ 대 t 의 그래프이며 적색은 λ_{linear} 대 t 의 그래프를 나타내는데 그림에서는 두개의 그래프가 완전히 중첩되어 구분할 수 없다. 이는 선형 스위핑이 잘 이루어지고 있음을 나타낸다. Fig. 11(b)에는 이들 간의 차이인 $\Delta\lambda(=\lambda_{\text{linear}} - \lambda_{\text{nonlinear}})$ 대 t 를 나타내었다. 이제 스위핑이 선형으로 진행되고 있으므로 $\Delta\lambda \approx 0$ 임을 보여준다. 측정에서 보여진 $\Delta\lambda$ 최대값은 평균적으

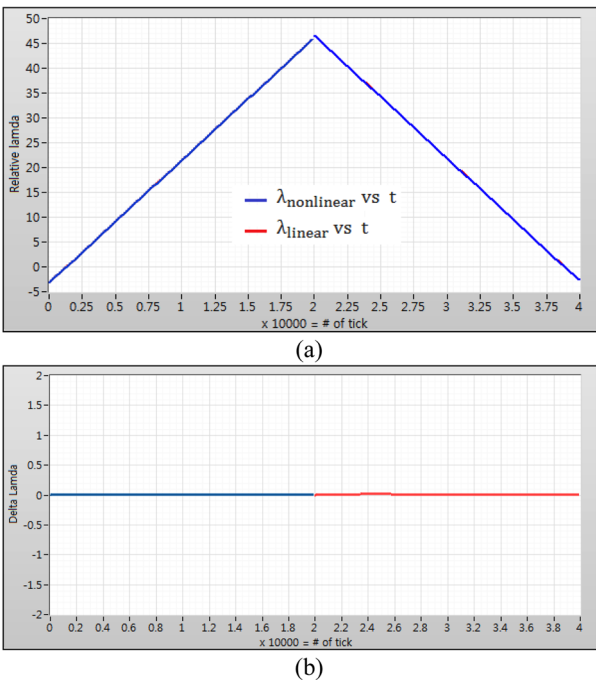


Fig. 11. Measurements in case of 10th compensated wave ; (a) λ vs t , (b) $\Delta\lambda(=\lambda_{\text{linear}} - \lambda_{\text{nonlinear}})$ vs t .

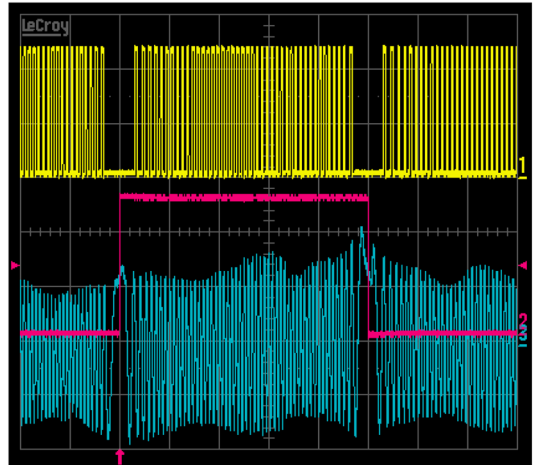


Fig. 12. Measured data ; (a) Digital pulse array from FBG array during sweeping, (b) Trigger signal for digital pulse capture, (c) Interference signal from Mach-Zehnder interferometer.

로 $\Delta\lambda_{\text{max}} = 0.02 \text{ nm}$ 이었다. 처음에 삼각파를 인가하였을 때의 $\Delta\lambda_{\text{max}} = 1.55 \text{ nm}$ 이었으므로 스위핑 자동 선형화 장치를 통하여 비선형성이 98.7% 만큼 감소되었음을 알 수 있다.

실험에서 파장 스위핑 레이저를 구성하는 SOA에는 600 mA의 전류가 공급되고 있으며 온도는 25°C로 유지되고 있다. Fig. 12의 상단의 노란색 파형은 디지털 전압 펄스 열을 보여준다. 이는 스위핑의 선형화 상태 즉 λ vs t 그래프를 얻기 위하여 설치한 FBG array로부터 반사된 광 펄스 열을 다시 광전 변환 회로에서 디지털 펄스 열로 변환한 것이다. 그림에서 디지털 펄스 열 중간에 있는 2군데의 공백은 실험에서 레이저의 실제 파장 스위핑을 FBG array(43개의 FBG로 구성, FBG간 $\delta\lambda = 1 \text{ nm}$ 의 반사 파장 범위보다 조금 더 크도록 설정하였기 때문이다. 그 이유는 레이저의 실제 파장 스위핑이 FBG array의 반사 파장 범위보다 더 작을 경우에 스위핑의 방향이 바뀌는 지점에서 디지털 펄스의 생성이 불안정해지고 이는 정확한 스위핑 상태 파악에 걸림돌로 작용할 수 있기 때문이다. 그림의 공백 부분에서의 실제 스위핑의 상태는 디지털 펄스 열로부터 얻어진 λ vs t 곡선에 대한 다항식 피팅을 통하여 얻어진다. 중간 단의 적색 펄스는 각 디지털 펄스의 상승 에지와 하강 에지 시점을 읽기 위한 트리거 신호로 사용된다. 하단의 청색 파형은 레이저의 스위핑 출력이 마하 쥘러 간섭계를 통과할 때 얻어지는 간섭 신호이며 이를 통하여 스위핑 방향이 바뀌는 시점을 알 수 있다. 즉 간섭신호에서 주파수가 가장 낮은 시점이 스위핑의 방향이 바뀌는 시점이다. 그림에서 이 시점들은 중간 단 트리거 신호의 상승 에지 및 하강 에지와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 이 시점들은 디지털 펄스 열 공백 부분의 중앙 시점과도 잘 일치함을 보여준다. 이를 통하여 λ vs t 의 상승 구간과 하강 구간의 측정이 정확하게 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 측정된 스위핑 스펙트럼을 보여준다. 그림으로부터

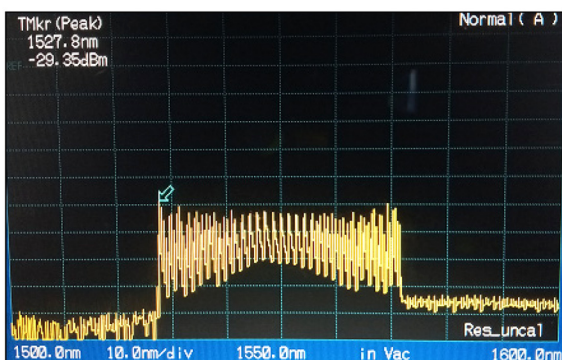


Fig. 13. Measured sweeping spectrum.

1550 nm를 중심으로 스위핑 범위가 약 45 nm 임을 알 수 있다. FFP-TF를 FSR = 160인 모델로 교체할 경우 90 nm 이상의 스위핑 범위를 확보할 수 있을 것이다. 측정된 레이저의 평균 광 출력은 8.8 mW 이었다.

고속 광대역 선형 스위핑 특성을 지닌 파장 스위핑 레이저 기술은 앞으로 기존 분광학 장치의 광원으로도 적용될 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 파장 스위핑 레이저의 선형 스위핑 특성을 자동으로 구현하는 PID 제어 방식을 제안하였다. 장치의 폐루프 전달함수를 구축한 후에 이의 시뮬레이션을 통하여 가장 적합한 PID 계수로서 $K_p = 0.022$, $K_i = 0.008$, $K_d = 0.002$ 을 도출하였다. 장치 제작 및 도출된 PID 계수를 사용한 실험을 통하여 1 kHz의 속도, 약 45 nm의 범위에 걸쳐 우수한 선형 스위핑 특성이 얻어 짐을 확인하였다. 특히 10번째 피드백 이후부터는 비선형성이 98.7% 만큼 감소되었다. 이 장치는 FBG array, 광전 변환 회로, DAQ 모듈, cRIO-9063, 그리고 LabVIEW FPGA 프로그램 등으로 구성된다. 선형 스위핑을 위한 FFP-TF 인가 파형 보정이 5 sec 간격으로 자동 수행되므로 기존의 비선형 스위핑 레이저에서 요구되는 결과 보정 과정의 복잡성 및 시간 소요 문제를 해결할 수 있으며 나아가 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부가 지원하는 이공분야 기초연구사업(기본연구)으로 수행된 연구 결과입니다(과제 번호 : 2019R1F1A105803812).

REFERENCES

- [1] K. O. Hill, and G. Meltz, "Fiber bragg grating fundamentals and overview", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 15, No. 8, pp. 1263-1276, 1997.
- [2] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 15, No. 8, pp. 1442-1463, 1997.
- [3] J. C. Suarez, B. Remartínez, J. M. Menéndez, A. Güemes, and F. Molleda, "Optical fibre sensors for monitoring of welding residual stresses", *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.143-144, pp. 316-320, 2003.
- [4] R. Huber, M. Wojtkowski, and J. G. Fujimoto, "Fourier domain mode locking (FDML): A new laser operating regime and applications for optical coherence tomography", *Opt. Express*, Vol. 14, pp.3225-3237, 2006.
- [5] J. S. Eom, "Realization of swept source-optical coherence tomography system using wavelength swept source based on FDML method", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 20, No. 1, pp.46-52, 2011.
- [6] R. Huber, M. Wojtkowski, K. Taira, J. G. Fujimoto, and K. Hsu, "Amplified, frequency swept lasers for frequency domain reflectometry and OCT imaging : design and scaling principles", *Opt. Express*, Vol. 13, pp. 3513-3528, 2005.
- [7] E. Hecht, *Optics*, Addison-Wesley, NY, 1987.
- [8] Y. Lig, Y. Wang, and C. Wen, "Temperature and strain sensing properties of the zinc coated", *OPTIK*, Vol. 127, No. 16, pp. 6463-6469, 2016.
- [9] J. C. Palais, *Fiber Optic Communications*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2005.
- [10] Y. Li, K. H Ang, and G. C. Y Chong, "PID control system analysis and design - Problems, remedies, and future directions", *IEEE Control Syst. Mag.*, Vol. 26, No. 1, pp. 32-41, 2006.
- [11] King and Myke, *Process Control : A Practical Approach*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2010.