

논문 2004-41SD-12-8

Fabry-Perot 레이저의 자기궤환 레이저 발진을 이용한 광섬유 길이 측정법

(Fiber Length Measurement Technique based on a Self-Seeding Laser Oscillation of a Fabry-Perot Laser Diode)

윤 기 홍*, 송 재 원*, 김 현 덕*

(Ki-Hong Yoon, Jae-Won Song, and Hyun Deok Kim)

요 약

본 논문에서는 폐경로를 통한 Fabry-Perot 레이저의 자기궤환 레이저 발진 현상을 이용하여 새로운 광섬유 길이 측정 방법을 제안하였다. Fabry-Perot 레이저에 변조전류를 인가하여 생성된 광펄스를 피측정 광섬유를 포함하는 폐경로를 통과한 후 다시 레이저로 입사시키면 특정 변조주파수에서 자기궤환 레이저 발진이 유도될 수 있다. 제안된 측정법에서는 특정 모드에서 자기궤환 레이저 발진을 유도하기 위한 변조주파수들을 측정하고, 이 변조주파수들 사이의 차를 이용하여 광섬유의 길이를 계산하도록 한다. 제안된 측정법을 이용하여 0.1 ~ 75 km 범위의 피측정 광섬유의 길이 측정을 수행하였고, 측정결과는 기존의 상용 계측기를 사용한 측정 결과와 잘 일치함을 실험적으로 검증하였다. 상용 계측기와의 상대 오차는 0.24 % 이하였고, 반복 측정오차(repeatability)는 0.1 % 보다 작았다.

Abstract

A simple fiber length measurement technique has been demonstrated by using a self-seeding laser oscillation of a Fabry-Perot laser diode. We induced a self-seeding laser oscillation through a closed-loop by adjusting the modulation frequency of a Fabry-Perot laser diode when the output optical pulse of the laser reinjected into the laser after passing through the closed-loop. The length of a fiber-under-test was calculated from the difference between any two modulation frequencies at which self-seeding laser oscillation occurs at a specific mode. We have experimentally confirmed the technique for various fiber lengths from 0.1 km to 75 km. The relative error between the measurement result of the proposed technique and that of a commercial instrument was less than 0.24 %. The repeatability of the proposed technique was better than 0.1 %.

Keywords : Fiber length, Fabry-Perot laser, Laser oscillation

I. 서 론

광섬유망의 포설 및 유지관리를 위해서는 광섬유 길이의 정확한 측정이 중요하며, 특히 광섬유의 손실계수 (dB/km), 색분산계수(ps/nm/km) 등의 파라미터들을 측

정하기 위해서는 반드시 광섬유 길이에 관한 정확한 정보가 있어야 한다. 기존에는 광섬유 길이를 측정하기 위해 주로 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)을 사용하여 왔다^[1-2]. OTDR을 이용한 측정법은 피측정 광섬유에 광펄스를 입력한 후 시간의 경과에 따라 반사되는 광펄스 파워를 측정하고, 측정된 반사 패턴과 광섬유 제조사 등에서 제공되는 광섬유 굴절률을 이용하여 광섬유 길이를 계산하게 된다.

OTDR을 구현하기 위해서는 좁은 폭을 가진 광펄스를 생성하기 위한 고속 광펄스 발생 장치와 반

* 정희원, 경북대학교 전자전기컴퓨터학부
(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R08-2003-000-10869-0)지원으로 수행되었습니다.

접수일자: 2004년11월16일, 수정완료일: 2004년12월4일

사되는 광펄스를 감지하기 위한 고속 광수신기를 필요로 한다. 따라서 기존의 OTDR은 구조가 복잡하고 가격이 비싼 단점이 있다. OTDR의 성능을 향상시키기 위해 유도라만산란 효과를 이용하여 광펄스의 파워를 높이는 방법과 Avalanche photodetector를 이용하여 수신감도를 향상시키는 방법, 광자계수검출법(photon-counting detection method) 등이 제안되었지만, 측정장치의 복잡도를 개선하지는 못하였다³⁻⁵⁾.

OTDR을 이용한 측정 방법 대신 참조(reference) 광섬유를 추가로 사용하여 피측정 광섬유와의 경로차에 의한 간섭 패턴을 측정하고, 이로부터 광섬유 길이를 추정하는 OLCR(Optical Low-Coherence Reflectometry) 측정법⁶⁾과 FMCWR (Frequency-Modulated Continuous Wave Reflectometry)⁷⁾ 측정법이 제안되었다. 이 측정법들은 거리해상도가 매우 좋은 장점이 있지만, 측정 가능한 광섬유의 길이가 매우 짧고 구조가 복잡하며, 동작이 불안정한 문제점이 있다.

본 논문에서는 기존 광섬유 길이 측정법의 문제점들을 해결하기 위해 Fabry-Perot 레이저의 자기궤환 레이저 발진 현상⁸⁾을 이용하여 구조가 간단하고 경제적인 광섬유 길이 측정법을 제안한다. 제안된 측정법은 저가의 Fabry-Perot 레이저에 변조전류를 인가하여 광펄스들을 생성하고, 광펄스들을 피측정 광섬유에 입력하며, 피측정 광섬유를 통과한 광펄스들이 Fabry-Perot 레이저로 자기궤환 될 때, 특정 모드에서 레이저 발진이 일어나기 위한 변조전류의 주파수 조건으로부터 광섬유 길이를 측정할 수 있도록 하였다.

II. 구성 및 동작원리

광섬유 길이를 측정하기 위해 제안된 측정장치의 구성도는 그림 1과 같다. 제안된 측정장치에서는 레이저의 출력이 폐경로를 통해 피측정 광섬유(FUT: Fiber-Under-Test)를 통과한 후 다시 레이저로 입력된다. 폐경로를 구성하기 위해 Fabry-Perot 레이저는 광회전기(optical circulator)의 공통 단자에, 피측정 광섬유의 한 단자는 광회전기의 출력단자에, 그리고 피측정 광섬유의 다른 한 단자는 편광제어기를 거쳐 광회전기의 입력단자에 연결된다. 따라서 Fabry-Perot 레이저(FP-LD)의 출력은 광회전기, 피측정 광섬유, 편광제어

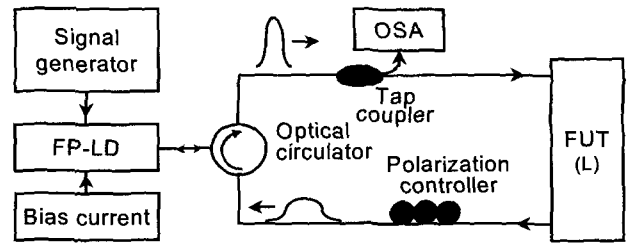


그림 1. 제안된 광섬유 길이 측정장치의 구성도

Fig. 1. Schematic diagram of the fiber length measurement system.

기(polarization controller), 그리고 다시 광회전기를 순차적으로 통과한 후 레이저로 자기궤환 된다.

폐경로를 통해 레이저 출력이 자기궤환 되면 Fabry-Perot 레이저의 고유 모드들 중에서 특정 한 모드에서만 발진하도록 유도할 수 있다⁹⁾. 폐경로를 통한 레이저의 자기궤환 레이저 발진을 더욱 효과적으로 유도하기 위해 광단향관(optical isolator)이 없는 Fabry-Perot 레이저를 사용하였으며, 폐경로에 편광제어기를 첨가하여 레이저로 재입사되는 광신호의 편광상태를 적절히 조절하였다. 폐경로 상의 광스펙트럼을 관찰하기 위해 광회전기의 출력단자와 피측정 광섬유의 한 단자 사이에 광파워분할기(tap coupler)를 삽입한 후 광스펙트럼분석기(optical spectrum analyzer : ANDO AQ-6315A)를 통해 광스펙트럼을 관찰하였다.

제안된 측정장치의 동작원리는 다음과 같다. 직류전류를 사용하여 레이저의 문턱전류보다 약간 작은 바이어스전류를 Fabry-Perot 레이저에 인가하고, 신호발생기에서 출력된 주기적인 변조전류를 함께 인가하면 레이저는 광펄스열을 출력한다. Fabry-Perot 레이저는 다중 모드 광원이기 때문에 적어도 두개 이상의 모드 성분들로 구성된 광펄스를 출력하며, 출력되는 광펄스의 반복률(repetition ratio)은 인가되는 변조전류의 변조주파수와 일치한다.

Fabry-Perot 레이저에서 출력된 광펄스의 각 모드별 성분들은 모두 변조전류에 동기화 되어 있으므로 동시에 레이저에서 출력되지만, 피측정 광섬유에서의 색분산 효과 때문에 모드별로 다른 군속도를 가지고 피측정 광섬유를 통과한다. 따라서 레이저에서 출력된 광펄스의 각 모드별 성분은 피측정 광섬유를 통과한 후 각기 다른 시간에 다시 레이저로 입력된다. 즉, 각 광펄스가 레이저를 출발한 후 다시 레이저로 재입사될 때까지의 경과시간-궤환시간-은 모드별로 달라진다. 이처럼 광펄스의 각 모드별 성분들이 폐경로를 통해 서로 다른 시

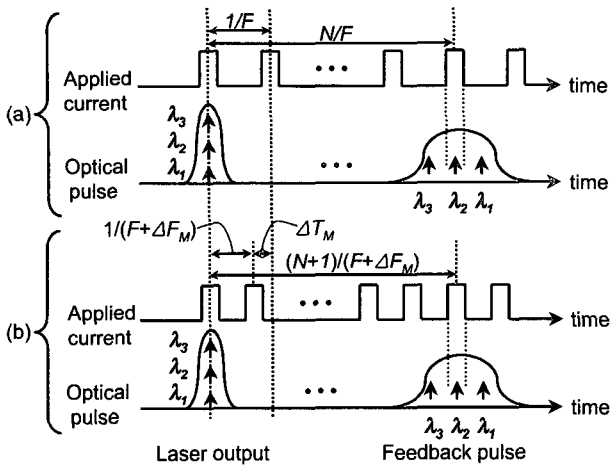


그림 2. 특정 모드에서 자기궤환 레이저 발진을 유도하기 위한 조건을 나타내는 시간 다이어그램 (a) 변조전류의 초기 주파수가 F 인 경우, (b) 변조전류의 주파수가 F 에서 $F+\Delta F$ 로 증가된 경우

Fig. 2. Timing-diagram describing the condition to induce a self-seeding laser oscillation at a specific mode (a) when the modulation frequency is initial value of F and (b) when the modulation frequency changes from F to $F+\Delta F$.

간에 레이저로 자기궤환 되면 변조주파수를 적절히 조절하여 특정 모드에서만 발진이 일어나도록 제어할 수 있다. 레이저에 인가되는 총전류(직류 바이어스전류와 변조전류의 합)가 레이저의 문턱전류보다 큰 순간에 한 특정 모드 성분만 주기적으로 레이저로 재입사 되도록 하면 Fabry-Perot 레이저는 그 특정 모드에서 발진하게 된다. 따라서 다중 모드 Fabry-Perot로부터 자기궤환에 의한 단일 모드 출력을 관찰 할 수 있다.

그림 2는 특정 모드에서 폐경로를 통한 자기궤환 레이저 발진이 일어나기 위한 조건을 나타낸 시간 다이어그램(timing diagram)이다. 여기서 Fabry-Perot 레이저는 세 개의 고유 모드 성분들($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)을 출력한다고 가정하였다. 그림 2(a)에 보인 바와 같이 광펄스의 세 모드 성분들은 레이저에서 동시에 출력되지만, 피측정 광섬유에서의 색분산 효과 때문에 각 모드별로 각각 다른 시간에 레이저로 재입사된다. 이와 같이 세 모드들이 시차를 두고 레이저로 재입사될 때, 레이저에 인가되는 총전류가 레이저의 문턱전류보다 큰 순간에 광펄스의 두 번째 모드(λ_2) 성분이 레이저로 재입사되면 다른 모드들은 억압되고, 오직 그 모드(λ_2)에서만 레이저 발진이 일어난다. 이처럼 다중 모드 레이저는 자기궤환

과정을 통해 한 모드에서만 발진할 수 있으며, 발진 모드는 각 모드별 궤환시간과 외부에서 인가되는 변조전류의 주파수에 의해 결정된다.

폐경로를 통한 자기궤환 레이저 발진에 의해 하나의 특정 모드(λ_2)에서 레이저 발진이 일어나기 위해서는 그 모드의 궤환시간이 레이저에 인가되는 변조전류 주기의 정수배가 되어야 한다. 이 경우 특정 모드(λ_2) 성분은 레이저에 인가된 총전류가 문턱전류보다 큰 순간에 그 항상 레이저로 재입사된다. 따라서 다음의 조건을 만족한다.

$$\frac{nL}{c} = \frac{N}{F} \tag{1}$$

여기서 n 은 피측정 광섬유의 굴절률, L 은 피측정 광섬유의 길이, c 는 자유공간에서 빛의 속도, F 는 변조전류의 주파수를 각각 나타낸다. 식(1)에서 좌변은 특정 모드(λ_2) 성분의 궤환시간을 나타내며, 피측정 광섬유의 길이에 의해 결정된다. 또, 우변에서 $1/F$ 은 변조전류의 주기를 의미하며, N 은 임의의 정수를 나타낸다.

광섬유의 길이가 주어지면 동일한 모드에서 자기궤환 레이저 발진이 일어날 수 있는 변조전류 주파수는 다수 존재할 수 있다. 즉, 피측정 광섬유의 길이에 의해 결정되는 특정 모드의 궤환시간이 변조전류 주기의 정수배가 되는 조건만 만족되면 다른 변조주파수에서도 동일한 모드에서 자기궤환 레이저 발진이 일어날 수 있다. 그림 2(b)에서 보인 바와 같이 변조전류의 주파수를 F 에서 $F+\Delta F$ 로 증가시킨 경우에도 두번째 모드(λ_2)에서 발진이 일어날 수 있다. 변조전류 주파수를 변경한 후, 동일 모드(λ_2)에서 다시 발진이 일어나기 위해서는 그 모드(λ_2)의 자기궤환 시간이 변경된 변조주기($1/(F+\Delta F)$)의 정수배가 되어야 한다. 변조전류의 초기 주파수를 F 로 설정하여 두번째 모드(λ_2)에서 자기궤환 레이저 발진을 유도한 후, 동일한 모드(λ_2)에서 다시 레이저 발진을 유도하기 위한 변조주파수의 최소 증가량을 ΔF 라 하면 두번째 모드(λ_2)의 궤환시간은 변경된 변조주기($1/(F+\Delta F)$)의 $(N+1)$ 배가 되어야 한다. 이 경우 궤환시간은 변조주파수와 무관하게 일정하므로 다음의 관계가 성립한다.

$$\frac{N}{F} = \frac{N+1}{F+\Delta F} \tag{2}$$

또, 초기 변조주기($T=1/F$)에서 변조주파수의 변

화(F 에서 $F+\Delta F$ 로 증가)에 따라 변경된 변조주기를 $T-\Delta T$ 라 하면 식(2)로부터 다음의 식이 성립한다.

$$\Delta T(N+1) = \frac{1}{F} \quad (3)$$

여기서 ΔT 는 변조주기의 미소 변화량으로 다음과 같이 정의되며, 만약 변조주파수의 증가량이 변조주파수에 비해 매우 작으면($\Delta F \ll F$) 다음의 관계가 성립한다.

$$\Delta T = \frac{1}{F} - \frac{1}{F+\Delta F} \approx \frac{\Delta F}{F^2} \quad (4)$$

동일한 모드에서 자기궤환 레이저 발진을 유도하기 위한 변조전류 주파수의 최소 변화량을 측정하면 식 (1), (3) 그리고 (4)로부터 유추된 다음의 관계를 이용하여 광섬유 길이를 계산할 수 있다.

$$L = \frac{c}{n\Delta F} \quad (5)$$

이상에서 보인 바와 같이 폐경로를 통해 Fabry-Perot 레이저가 특정 모드에서 자기궤환 레이저 발진하도록 변조전류 주파수를 설정한 후, 변조주파수를 변경하여 다시 동일 모드에서 레이저 발진을 유도하기 위한 변조전류 주파수의 최소 변화량(ΔF)을 측정하면 광섬유 길이를 구할 수 있다. 측정에서는 먼저 특정 모드가 발진하는 변조주파수를 찾고, 변조주파수를 연속적으로 변화시키면서 다시 동일한 모드에서 발진할 변조주파수를 찾음으로써 변조전류 주파수의 최소 변화량(ΔF)을 측정할 수 있다. 이처럼 광섬유 길이를 측정함에 있어서 변조주파수의 절대값에 관한 정보는 필요 없고, 오직 변조주파수의 변화량만 고려하면 되므로 교정(calibration)과정이 비교적 간단한 특징이 있다. 식(4)를 유도하는 과정에서 두번째 모드(λ_2)에서 자기궤환 레이저 발진이 일어난다고 가정하였지만, 임의의 모드를 선택하더라도 동일한 결과를 얻을 수 있다.

III. 실험 및 실험결과

광섬유의 길이를 측정하기 위해 중심 파장과 모드 간격이 각각 1545.32 nm와 1.16 nm인 일반적인 Fabry-Perot 레이저를 사용하여 그림 1과 같은 실험장치를

구현하였다. Fabry-Perot 레이저의 문턱전류는 5 mA이고, 레이저의 온도는 별도로 제어하지 않았다. 4.6 mA의 직류 바이어스전류를 레이저에 인가한 후, 광펄스를 생성하기 위해 신호발생기의 출력을 이용하여 레이저에 14 mA의 변조전류(peak-to-peak)를 인가하였다. LG선에서 제공한 단일 모드 광섬유를 피측정 광섬유로 사용하였으며, 광섬유의 굴절률은 1545.32 nm에서 약 1.45였다.

그림 3(a)는 레이저에 직류 바이어스전류만 인가한 상태에서 측정된 광스펙트럼이다. 바이어스전류만 인가된 Fabry-Perot 레이저는 다중 모드 출력 특성을 나타내었다. 그림 3(b)는 500 MHz의 변조전류를 인가하여 폐경로를 통한 자기궤환 레이저 발진이 유도된 상태에서 측정된 광스펙트럼이다. Fabry-Perot 레이저에 주파수가 500 MHz인 변조전류를 인가하면 중심파장이 1545.32 nm인 모드에서 자기궤환 레이저 발진이 일어나고, 단일 모드 출력이 관찰되었다.

레이저에 인가되는 변조전류의 주파수를 연속적으로 증가시켰을 때 다시 동일한 모드에서 레이저 발진을 유도할 수 있었다. 즉, 그림 3(b)에 보인 바와 같이 변조전류의 주파수를 188.93 kHz만큼 증가시켰을 때 중심파장이 1545.32 nm인 모드에서 다시 자기궤환 레이저 발진이 일어났다. 따라서 중심파장이 1545.32 nm인 모드에서 다시 자기궤환 레이저 발진을 유도하기 위해 필요한 최소 주파수 변화량(ΔF)은 188.93 kHz임을 알 수 있고, 이 값을 식(5)에 대입하여 피측정 광섬유의 길이를 계산할 수 있다. 계산된 피측정 광섬유의 길이는 1.0810 km였다.

제안된 측정법의 정확도를 검증하기 위해 상용 OTDR(모델명: Anritsu MW9060A)을 사용하여 동일한 피측정 광섬유의 길이를 측정하였다. 사용된 상용 OTDR의 거리 해상도(spatial resolution)는 약 2 m였고, 측정치는 약 1.0814 km였다. 따라서 상용 OTDR을 사용한 결과와 제안된 방법을 사용한 측정 결과 사이의 오차(상대비)는 약 0.04% 이하였다.

제안된 광섬유 길이 측정법의 측정 범위를 분석하기 위해 다양한 길이의 피측정 광섬유를 사용하여 측정을 반복하였다. 최장 피측정 광섬유의 길이는 약 75 km였고, 최단 피측정 광섬유의 길이는 약 0.1 km였다. 피측정 광섬유의 길이가 증가하면 손실이 증가하여 자기궤환 효율이 감소하는데, 제안된 측정장치에서는 약 75 km의 피측정 광섬유를 사용한 경우에도 자기궤환 레이

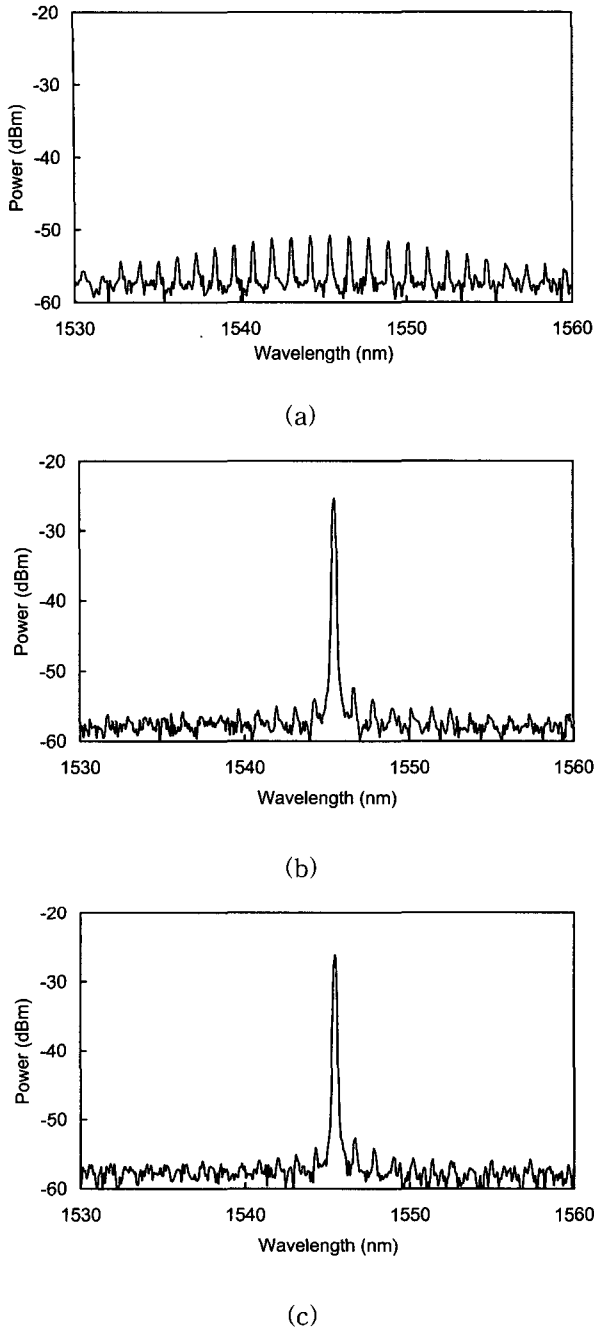


그림 3. 피측정 광섬유의 길이가 약 1km일 때 측정된 광스펙트럼 (a) 자기궤환 레이저 발진이 없는 상태 (b) 특정 모드에서 자기궤환 레이저 발진이 일어나는 상태 (c) 다른 변조 주파수에서 동일한 모드에서 자기궤환 레이저 발진이 발생하는 상태

Fig. 3. Measured optical spectra with a fiber length of about 1 km (a) without self-seeding laser oscillation, (b) with a self-seeding laser oscillation at a specific mode and (c) with a self-seeding laser oscillation at the mode for different modulation frequency.

저 발진을 유도할 수 있었다. 그림 4는 길이 75 km의 피측정 광섬유를 사용한 상태에서 자기궤환 레이저 발진하는 광스펙트럼을 측정한 결과이다. 피측정 광섬유의 길이가 짧은 경우에 비해 자기궤환 효율이 감소하므로 SMSR(side-mode suppression ratio)이 상대적으로 감소하였지만, 여전히 자기궤환 레이저 발진을 감지할 수 있었다.

길이가 다른 다양한 종류의 피측정 광섬유에 대해 제안된 측정법을 사용한 결과와 상용 OTDR을 사용한 측정결과를 표 1에 비교하여 나타내었다. 제안된 측정법을 사용한 결과와 상용 OTDR을 사용한 경우와의 오차는 최대 0.24 % 이내였다. 또 제안된 측정법의 재현성(repeatability)을 검증하기 위해 동일한 조건에서 수십 차례 실험을 반복하였는데, 제안된 측정 장치의 재현성은 0.1 %보다 좋음을 알 수 있었다.

제안된 측정법의 정확도는 인가되는 변조전류의 파형에 의해 영향을 받는데, 본 실험에서는 사인파 형태의 파형만을 인가하였다. 하지만 duty ratio를 조절할 수 있는 변조전류 파형을 인가한다면 정확도를 개선할 수 있을 것이다. 중심파장이 1545.32 nm인 모드 뿐만 아니라 다른 고유 모드들이 발진하도록 변조주파수를 설정하고 광섬유 길이 측정을 반복하였는데, Fabry-Perot 레이저의 고유 모드 중 어떤 모드를 선택하더라도 비슷한 측정 결과를 얻을 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 폐경로를 통한 Fabry-Perot 레이저의 자기궤환 발진 현상을 이용하여 새로운 광섬유 길이 측정법을 제안하였고, 측정 장치를 구현하여 그 성능을 실험적으로 검증하였다. 제안된 측정법은 피측정 광섬유를 포함하는 폐경로를 통한 Fabry-Perot 레이저의 자기궤환 발진에 필요한 변조전류 주파수의 변화를 측정하고 이를 이용하여 광섬유의 길이를 계산한다. 제안된 측정법을 사용하여 약 0.1 ~ 75 km의 피측정 광섬유의 길이를 측정할 수 있음을 실험적으로 보였다. 또, 제안된 측정 장치를 이용하여 측정한 결과는 기존의 상용 계측기를 사용한 측정 결과와 잘 일치함을 실험적으로 검증하였는데, 상용 계측기와의 상대적인 차는 0.24 % 이하였고, 재현성은 0.1 % 보다 좋았다. 제안된 측정장치는 기존의 OTDR에 비해 구

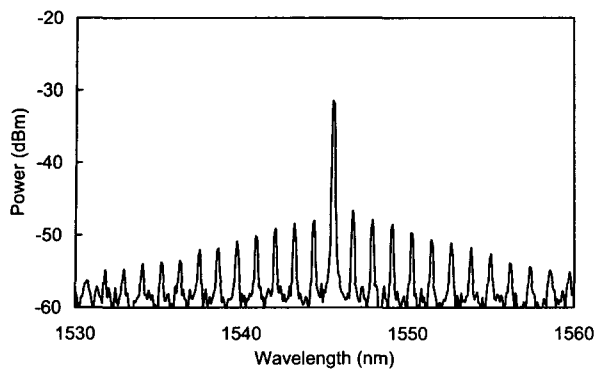


그림 4. 피측정 광섬유의 길이가 약 75 km일 때 측정된 광스펙트럼

Fig. 4. Measured optical spectra with a fiber length of about 75 km.

표 1. 광섬유 길이 측정결과

Table 1. Fiber length measurement results.

제안된 측정법		상용 OTDR	상대비 (%)
ΔF_M (kHz)	L (km)	L (km)	
1713.63	0.107	0.107	0.08
391.77	0.514	0.514	0.09
188.93	1.081	1.081	0.04
8.086	25.573	25.534	0.15
2.749	75.249	75.045	0.24

조가 간단할 뿐만 아니라 인가되는 변조주파수의 절대값을 측정하는 것이 아니라 상대적인 변화값을 측정하므로 교정과정이 간단한 장점이 있다.

본 논문에서 보인 실험에서는 폐경로를 통한 레이저 발진을 관찰하기 위해 광스펙트럼분석기를 사용하였는데, 비용을 절감하거나 현장 적용을 위해 대역통과필터 (bandpass filter)와 광파워검출기(optical power detector)를 사용하여 광스펙트럼분석기를 대체할 수 있다. 또 피측정 광섬유의 양 단자를 측정장치에 연결하여 길이를 측정하였는데, 피측정 광섬유의 한 단자는 측정장치에 연결하고 다른 단자에는 반사경(mirror)을 연결하여 레이저 발진을 유도함으로써 광섬유의 길이를 측정할 수 있다.

참고 문헌

[1] M. K. Barnoski, M. D. Rourke, S. M. Jensen, and R. T. Melville, "Optical time domain reflectometer," *Appl. Opt.*, Vol. 16, pp. 2375-2379, 1977.
 [2] Y. Horiuchi et al, "Novel coherent heterodyne optical time domain reflectometry for fault

localization of optical amplifier submarine cable systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 2, pp. 291-293, 1990.

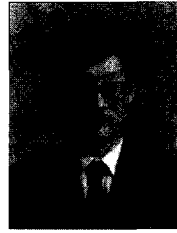
- [3] K. Noguchi, "A 100-km-long single-mode optical-fiber fault location," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 2, pp. 1-6, 1984.
 [4] K. Suzuki, K. Noguchi, and N. Uesugi, "Long-range OTDR for single-mode optical fibre using a P205 highly doped fiber Raman laser," *Electron. Lett.*, Vol. 22, pp. 1273-1274, 1986.
 [5] C. G. Bethea, B. F. Levine, S. Cova, and G. Ripamonti, "High-resolution and high-sensitivity optical-time-domain reflectometer," *Opt. Lett.*, Vol. 13, pp. 233-235, 1988.
 [6] B. L. Danielson and C. D. Whittenberg, "Guided-wave reflectometry with micrometer resolution," *Appl. Opt.*, Vol. 26, pp. 2836-2842, 1987.
 [7] D. Uttam, B. Culshaw, "Precision time domain reflectometry in optical fiber systems using a frequency modulated continuous wave ranging technique," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 3, pp. 971-977, 1985.
 [8] D. Huhse, M. Schell, J. Kaessner, D. Bimberg, I. S. Tarasov, A. V. Gorbachov, and D. Z. Garbuzov, "Generation of electrically wavelength tunable ($\Delta\lambda=40\text{nm}$) singlemode laser pulses from a $1.3\mu\text{m}$ Fabry-Perot laser by self-seeding in a fibre-optic configuration," *Electron. Lett.*, Vol. 30, pp. 157-158, 1994.
 [9] Ki-Hong Yoon, Jae-Won Song, Hyun Deok Kim, "A simple dispersion measurement by using a self-seeding laser oscillation of Fabry-Perot laser diode," *OFC 2004*, ThP 5, 2004.

저 자 소 개



윤 기 홍(정회원)
 1995년 영남대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1998년 경북대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 1998년 ~ 현재 경북대학교 전자
 공학과 박사과정 재학 중.

<주관심분야: 광통신, 레이저, 광학>



송 재 원(정회원)
 1978년 경북대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1980년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과 석사 졸업.
 1984년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과 박사 졸업.

<주관심분야: 광통신, 레이저, 광소자>



김 현 덕(정회원)
 1997년 경북대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1999년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과 석사 졸업.
 2002년 한국과학기술원 전자전산
 학과 박사 졸업.

<주관심분야: 통신시스템, 광통신, 광네트워크>

