광섬유 장주기 격자와 어븀 첨가 광섬유를 이용한 동적 스트레인 센싱을 위한 새로운 고분해능 파장 측정 시스템

정재훈, 이용욱, 이병호
서울대학교 전기공학부

Novel Interrogation System for Dynamic Strain Measurement based on Fiber Bragg Grating Sensor using Long Period Grating Pair and EDF

Jaehoon Jung, Yong Wook Lee, and Byoungho Lee
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - 본 논문에서는 광섬유 장주기 격자쌍과 두 장주기 격자 사이에 삽입된 어븀 첨가 광섬유를 이용하여, 광섬유 브래그 격자 센서 헤드에 가해지는 동적 스트레인을 측정하기 위한 새로운 고분해능 파장 측정 시스템을 제안하였다. 제안된 측정 시스템에 대한 실험을 통해 제안된 시스템이 기존의 비대칭 마하 젠더 간섭계를 이용한 파장 측정 시스템에 비하여 훨씬 높은 분해능을 갖고, 외부 온도 변화에 대한 변동 또한 훨씬 적어진 것을 보였다.

1. 서 론

파장 측정 기법은 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating:이하 FBG) 기반의 광섬유 센서 분야에 있어서 상당한 관심사가 되어 왔다. 수많은 기법들이 제안됐으나, 대부분의 기법들이 미세한 파장의 변위를 측정할 수 있는 충분한 분해능을 갖고 있지 못하다. 마하 젠더 간섭계(Mach-Zehnder Interferometer:이하 MZI) 센서는 넓은 대역폭과 함께 파장의 변위를 높은 분해능으로 측정할 수 있음을 보여주었다[1]. 그러나, MZI는 주변의 온도 변화에 대해 매우 민감해서 시간이 지남에 따라서 간섭 신호가 고정되지 않고 천천히 흘러가는 모습을 보이기 때문에, MZI를 이용한 파장 측정기에서는 이러한 온도에 의한 변동을 막기 위해, 완전한 온도 격리 과정이나 기준 격자를 삽입해야 될 필요성이 있다. Dianov 등은 두 개의 직렬로 연결된 장주기 광섬유 격자(Long-Period Grating:이하 LPG)를 이용하여 새로운 형태의 마하 젠더 간섭계를 제안하였다[2]. 이 LPG쌍을 이용한 간섭계는 기존 MZI의 위에서 언급된 단점들이 나타나지 않아 많은 실용적인 목적으로 사용될 수 있다. 본 논문에서는 LPG쌍과 두 LPG사이에 삽입된 어븀 첨가 광섬유(Erbium Doped Fiber:이하 EDF)를 이용하여, 동적 스트레인을 측정하기 위한 FBG 센서의 새로운 파장 측정 시스템을 제안하였다.

2. 원리 및 실험결과

2.1 원리

위에서 언급된 두 LPG사이에 EDF가 삽입된 구조에서 EDF가 펌핑(pumping)되면, EDF의 코어(core)로 진행하는 코어 모드(core mode)는 증폭이 되는데, 증폭되는 양은 남아있는 코어 모드의 세기에 따라 다르고, 파장마다 남아 있는 코어 모드의 양이 다르므로, 파장에 따라 증폭률이 다르게 된다[3].

그림 1은 제안된 파장 측정 시스템의 실험 개념도이다. 광대역 광원은 WDM 커플러(coupler)를 통과하여, EDF가 삽입된 LPG쌍을 거친 뒤, 광 아이솔레이터(isolator)를 거쳐, 2x1 커플러를 통과하여 FBG로 들어가게 된다. FBG에서는 3dB 대역폭이 0.4nm인 브래그 파장의 빛이 반사되며, 반사된 빛은 광 검출기로 입력된다. 그리고, 광 검출기에서 출력된 전기적인 신호는 스트레인에 대한 정보를 담고 있는 기본 주파수 신호의 저 잡음 검출을 위해 락인 증폭기(Lock-In Amplifier)로 입력된다.

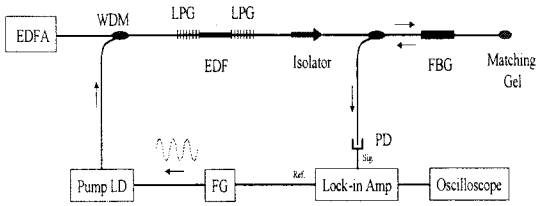

그림 1. LPG쌍과 두 LPG 사이에 삽입된 EDF를 이용한 FBG 스트레인 센서의 파장 측정 시스템 개념도 (단, WDM: Wavelength Division Multiplexer, EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier, FG: Function Generator)

2.2 실험 결과

실험은 펌프 레이저 다이오드(Pump Laser Diode: 이하 Pump LD)의 변조 여부에 따라 크게 두 부분으로 나뉘어져 수행되었으며, 각각의 실험 결과는 다음과 같다.

2.2.1 Pump LD 신호를 변조하지 않았을 경우

우선, EDF의 증폭을 위한 Pump LD로의 주입 전류의 변조 없이 동적 스트레인 측정 실험을 수행하였다. FBG 센서 헤드(head)에 가해지는 동적 스트레인은 PZT(Piezoelectric Transducer)를 전기적인 신호로 구동하여 인가되었다. 동적 스트레인에 대한 정보를 실은 출력 신호의 주파수 분포를 분석하기 위해, FFT 네트웍 분석기(SRS 780)를 사용하여 그 주파수 분포를 분석하였다.

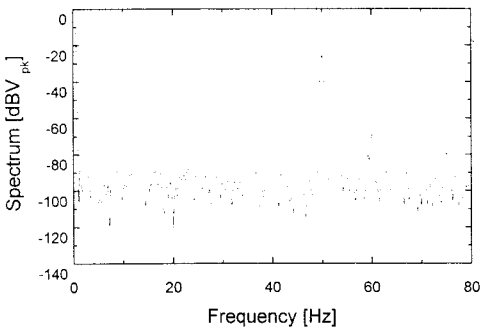

그림 2. Pump LD의 주입 전류의 변조 없이 센서 헤드에 가해진 50Hz, 220 μstrain(rms)의 동적 스트레인을 측정했을 경우의 FFT 스펙트럼

그림 2는 FBG 센서 헤드에 주파수가 50Hz, 크기가 220μstrain(rms)인 동적 스트레인 신호가 인가되었을 경우, 광 검출기에서 출력되는 전기적 신호를 FFT 분석한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 센서 헤드인 FBG에 부착되어 있는 PZT를 구동하는 전기적 신호의 주파수에서 피크(peak) 값을 보이는 것을 알 수 있다. 50Hz에서의 신호 대 잡음비는 75dB이었으며, 이 경우의 검출 가능한 최소 스트레인 변동 값은 대략 6.96 $p$strain(rms)/ $Hz^{1/2}$이었으며, 이 값은 MZI를 이용한 기존의 결과에 비하면 매우 향상된 분해능 값이다[1]. 그림에서 두 번째 피크는 60Hz에서 발견되는데, 이는 전원 전력의 잡음 성분 때문인 것으로 생각된다. Pump LD를 변조하지 않고 동적 스트레인을 측정한 본 실험의 경우에서는 매우 높은 분해능을 얻을 수 있었지만, 이 측정 기법은 광원의 세기에 천천히 요동이 일어나기 때문에, 정적 스트레인 측정에는 적용할 수가 없다는 단점이 있다.

2.2.2 펌프 LD 신호를 변조하였을 경우

두 번째 실험으로 Pump LD에 주입되는 전류 신호를 변조하여, 동적 스트레인을 측정하였다. Pump LD를 변조할 경우에는 광 검출기에서 출력되는 전기적인 신호 중 변조 주파수의 기본파 성분 내에 센서 헤드에 인가된 동적 스트레인에 대한 정보가 들어있게 된다. 따라서 락인 증폭기를 사용하여 광 검출기 출력 신호 중 동적 스트레인에 대한 정보를 담고 있는 기본파 성분을 추출해 내고, 여기서 추출된 기본파 성분은 정현적인 파형을 갖기 때문에 락인 증폭기를 사용하여 이 성분의 피크 값의 변동을 따로 추출해내면 이 추출된 신호가 바로 동적 스트레인 신호가 된다. 위와 같은 과정을 통해 동적 스트레인 신호를 추출해내고, 추출된 신호를 FFT 네트웍 분석기를 통해 신호의 주파수 분포를 분석하였다. 실험에서는 5KHz의 주파수로 Pump LD를 변조하면서, 센서 헤드에는 주파수 100Hz, 크기 220μstrain(rms)인 동적 스트레인 신호를 인가하였다.

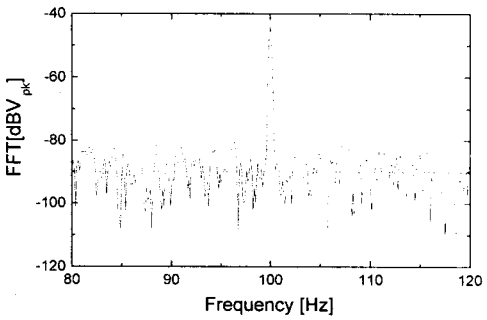

그림 3. Pump LD의 주입 전류를 5KHz의 주파수로 변조한 경우 센서 헤드에 가해진 100Hz, 220μstrain(rms)의 동적 스트레인을 측정했을 경우의 FFT 스펙트럼

그림 3은 동적 스트레인 신호를 측정하기 위해 락인 증폭기에서 추출한 출력신호를 FFT 분석한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 PZT를 구동한 주파수인 100Hz에서 피크 값이 되는 것을 볼 수 있으며, 이 피크의 신호 대 잡음비는 44dB이었다. 따라서 Pump LD를 변조시켜, 동적 스트레인을 측정한 경우에 검출 가능한 최소 스트레인 변동 값은 대략 8.76 $n$strain / $Hz^{1/2}$였다.

그림 4는 센서 헤드에 스트레인을 가하지 않은 상태에서 Pump LD를 변조시키고, 광 검출기의 출력 신호에서 락인 증폭기를 사용하여 기본 주파수 성분을 추출하고, 추출된 신호의 피크 값의 변동을 살펴본 것으로써, 제안된 파장 측정 시스템은 외부 온도에 의한 영향도 기존의 MZI에 비해 훨씬 줄어든 것을 확인 할 수 있었다[3].

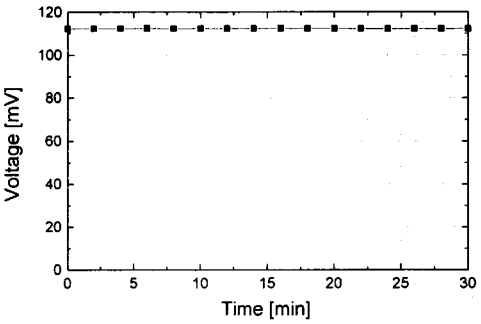

그림 4. 락인 증폭기에서 추출된 신호의 피크 값의 시간에 따른 외부 온도에 의한 영향

3. 결 론

본 논문에서는 LPG쌍과 두 LPG사이에 삽입된 EDF를 이용하여, 동적인 스트레인을 측정하기 위해서 새로운 파장 측정 시스템을 제안하였다. 동적 스트레인 측정을 위한 실험을 수행하였으며, 실험을 통하여 제안된 파장 측정 시스템이 높은 분해능으로 동적 스트레인 측정이 가능함을 보였고, 또한 기존의 MZI를 사용한 파장 측정 시스템에 비해 주변 온도의 영향에 대해 우수한 안정성을 가짐을 보였다.

※ 본 연구는 부분적으로 기초전력공학공동연구소를 통한 한국전력의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "High resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength shift detection", Electron. Lett., vol. 28, pp. 236-238, 1992.

[2] E. M. Dianov, S. A. Vasiliev, A. S. Kurkov, O. I. Medvedkov, and V. N. Protopopov, "In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on a pair of long-period gratings", in Proc. Of European Conf. on Optical Communication, Gent, Belgium, pp. 65-68, 1997.

[3] J. Jung, Y. W. Lee, and B. Lee, "High-resolution interrogation technique for fiber Bragg grating strain sensor using long-period grating pair and EDF", 제 7 회 광전자 및 광통신 학술회의 논문집, pp. 151-152, 2000년 5월.