FBG 다중화 센서 탐촉자 구동 및 측정을 위한 인터로게이터 설계 제작

김지대^a, 이동주^{b*}

Implementation of an Interrogator for the Operation and Measurement of Fiber Bragg Grating Multiplexing Sensor Probes

Ji-Dea Kim^a, Dong-Ju Lee^{b*}^a Lab. of Machining and Measurement, 305-764, Chungnam National University Gung-dong Yuseong-gu Daejeon, Republic of Korea^b Dept. of Mechanical Engineering, 305-764, Chungnam National University Gung-dong Yuseong-gu Daejeon, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	13	March	2014
Revised	4	April	2014
Accepted	8	April	2014

Keywords:

Wind power generator blade
Interrogator
Fiber bragg grating sensor
Monitoring system
Wavelength stability
Wavelength division Multiplexing

ABSTRACT

This research focuses on the development of an interrogator that operates and measures fiber Bragg grating(FBG) multiplexing sensor probes for accurate-measurement of the blade deflection in a wind power generator. We designed and fabricated an optical source and spectrum module for the interrogator. Additionally, we verified the wavelength repeatability within 0.001 nm and the wavelength stability within 1 pm of the optical source, and we experimentally determined that the wavelength scanning range was about 44.4 nm. The FBG sensor with 2 nm resolution can be extended to a performance-efficient system that measures more than 20 sensors. The implemented interrogator has 0.141 nm wavelength variations corresponding to an ambient temperature range of 0 °C to 70 °C. The measurement error can be easily reduced by employing a temperature compensation algorithm. In this study, we quantitatively confirmed the accuracy and operating stability of the interrogator.

1. 서론

전 세계적으로 녹색산업 및 그린 정책에 따른 친환경 에너지 산업에 비중이 현저히 높아지고 있는 가운데, 에너지 사용의 급증으로 인한 발전 시설 및 전기 에너지가 현저히 부족한 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 발전 시설들은 현재 대형화되고 있는 추세이며, 또한 친환경 발전 시설에 여러 나라들이 기술 개발에 노력을 하고 있다. 여러 발전 시설들 중의 하나인 풍력 발전은 바람을 이용한 친환경 발전 시설을 대표하고 있다. 따라서 풍력 발전기는 수요 및 고용량의 발전을 위해 풍력발전기 타워 및 블레이드가 대

형화 되고 있다^[1]. 이렇게 대형화된 구조물들은 주변 환경 및 외부 요인으로 인한 블레이드의 타격 또는 난류와 같은 바람에 피로 파괴 등의 영향을 받는다. 이렇게 시작된 사소한 고장은 발전기 타워를 타격하여 붕괴시키는 등의 2차의 대형 사고를 야기 시키며 따라서 대형 시스템의 안전성과 운용의 편리성을 위해 구조 건전성 모니터링(Structural health monitoring)이 절실히 필요하다. 구조건전성 모니터링은 무엇보다 시스템의 우수한 성능 확보와 신뢰성이 요구된다. 또한 구조물에 측정시스템을 설치 시에 기능에 영향을 주지 않는 장착성과 편리성이 요구된다. 그리고 대형 구조물의 광범위한 물리량 측정이 동시에 실시하여야 하므로 다점 측정이 가능

* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5648

Fax: +82-42-822-5642

E-mail address: dongju@cnu.ac.kr (Dong-Ju Lee).

한 센서 시스템이 필요하다^[4]. 현재 일반적으로 가장 많이 사용하고 있는 기술로는 전기식 측정 센서인 스트레인게이지(Electrical strain gauge), 가속도계(Accelerometer), 압전 센서(Piezoelectric sensor)등이 산업 현장 및 측정 시스템에 많이 사용하고 있다. 기존의 전기적인 센서들은 이용이 간단하고 실시간 측정이 가능하며 안정적인 측정 결과를 보여주고 있다. 하지만 전기 신호를 이용하기 때문에 전기장 및 자기장이 강한 환경에서는 잡음 신호가 심하여 측정 신호에 영향 받기 쉬운 로우 레벨(Low Label)의 전기 신호가 많이 발생하여 정확도를 떨어뜨리고 있다.

특히 센서들과 측정시스템이 멀리 떨어져 있는 구간에서는 측정 신호선의 저항으로 발생하는 전압 강하 때문에 정확한 측정 또한 어려운 실정이다^[5]. 또한 다채널 시스템의 경우 센서 하나 당 신호 케이블을 할당하여야 하기 때문에 협소한 공간적이나 무게에 영향을 받는 구조물에서는 설치에 제약이 따르게 된다. 그리고 측정 장비의 규모와 비용이 매우 커지는 문제점도 따른다^[3]. 이러한 단점을 보완해줄 수 있는 광섬유 브래그 격자(Fiber bragg grating, FBG)센서는 직경이 250 μm 로 작고 가벼우므로 구조물의 기능에 영향을 주지 않으면서 외부에 장착 또는 내부에 삽입이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 하나의 광섬유에 브래그 격자의 중심 파장을 서로 다르게 하여 여러 개의 센서를 제작할 수 있다는 특징도 가지고 있다^[6,7]. 이 장점을 이용하면 동시에 여러 지점을 측정할 수 있는 다점 측정 센서가 만들어진다. 이러한 장점을 이용하여 해상도가 높은 단일점 센서와 넓은 영역을 모니터링 할 수 있는 분포형 센서의 장점을 다중화 기법에 의해 결합한 준분포형 센서로의 확장이 가능하다^[4,8,9].

그러나 센서 시스템에서 센서 동작 및 측정을 하기 위해 사용되는 장비가 인터로게이터이다. 현재 개발되어 시판중인 인터로게이터는 주로 파이버 페브리페로 필터(Fiber fabry-perot tunable filter, FFP-TF)를 이용하여 측정하는 방식을 사용하고 있다^[10]. 때문에 필터뿐만 아니라 장비 자체가 수 천만원의 고가를 형성하고 있다. 따라서 기술 실용화가 어려운 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 바람에 따른 블레이드의 하중 측정을 위한 알고리즘 개발을 위해 인터로게이터의 구동 방식을 FFP-TF를 대신할 수 있는 광대역 광원과 분광 모듈을 개발하고, 개발된 모듈을 메인 프로세서에 일체화하여 외부 인터페이스가 가능하고 안정적으로 작동하는 인터로게이터를 저가형으로 개발하고자 한다.

2. 인터로게이터 설계 제작

2.1 인터로게이터 구성

인터로게이터는 FBG 센서에 신호를 인가하고, 이때 센서마다 되돌아오는 파장을 측정하여 풍력 블레이드의 하중 및 처짐 특성을

Fig. 1 Block diagram of interrogator

Fig. 2 Fabricated interrogator box and interface

확인할 수 있다. Fig. 1에서 보는 것과 같이 알고리즘 개발을 위해 인터로게이터를 구성하였다. 인터로게이터 시스템은 파장 영역의 다중화 식별을 위하여 SLED (Super luminescent light emitting diode) 광원을 사용하였고, 시간 영역에서의 식별을 하기 위하여 FBG 센서에서 반사되는 반사광을 서큘레이터를 통하여 분광기로 입력받아 PD (Photodiode) Array를 이용하여 신호를 측정하였다. 이때 측정된 신호는 빛이 도달되는 시간에 의해 구분되며, 짧은 시간을 구분할 수 있어야 하므로 고속 측정이 가능한 시스템이어야 한다. 따라서 다점 측정 센서인 여러 개의 FBG 센서의 측정을 위해 데이터의 고속 처리와 파장 측정을 위하여, 고속으로 운용할 수 있는 마이크로 프로세서 모듈과 외부 인터페이스 장치회로, 그리고 FBG 센서에 안정된 광원을 입사하기 위한 레이저 구동회로, 그리고 FBG 센서에서 되돌아오는 반사광의 신호를 구별하기 위해 파장을 측정 및 판별 회로로 구성하였다. Fig. 2은 제작된 인터로게이터 장치 구성 및 전면의 외부 인터페이스 외형을 나타내었다.

2.2 프로세서 모듈 및 인터페이스 장치

프로세서 모듈은 측정 시퀀스 제어회로의 각종 파라미터(스캔시작/종료, 스캔주파수)들을 설정하고 레이저 구동 회로의 성능 값 모

니터링과 제어를 수행한다. 이에 따라 측정된 데이터 중 유효한 데이터를 판별 처리하고, 결과 값을 GUI (Graphical user interface)를 통하여 화면에 출력하며, 결과 데이터를 저장하는 기능을 수행한다. 프로세서 모듈은 Intel Atom D525 Processor를 이용하여 각각의 기능과 성능을 감시하고 제어하는 기능을 수행하도록 하였다. 추가적으로 외부 인터페이스에서 들어오는 명령을 처리하고 이에 따른 결과와 보드의 상태 정보를 외부 인터페이스를 통하여 사용자가 확인할 수 있도록 하였다. 그리하여 VGA (Video graphics array), Gigabit Ethernet, USB/IDE/SATA/PCI/COM 등의 I/O (Input/Output) 기능을 함께 사용하도록 하였다. 외부 인터페이스는 무선 근거리 통신을 위한 2.4 GHz Zig-bee와 빠른 데이터 전송을 위해 Gigabit Ethernet을 사용하도록 하였다. 고속 측정 및 연산 처리속도를 높이기 위해 Dual-Core 1.8 GHz CPU (Central processing unit)와, 저장 장치로는 128 Gbyte의 SSD (Solid state drive)를 사용하였다.

2.3 파장 스캔 검출

파장 스캔 검출에서 스캔 시퀀스 로직을 구성하기 위한 FPGA (Field programmable gate array)와 고속 16bit ADC (Analog to digital converter) 및 파장 스캔 회로(Signal scanning circuit)를 설계하였다. 16Bit ADC은 256채널 PD Array IC를 사용하였으며, 분광기로 통해 입사되는 광의 세기를 측정하도록 하였으며, 파장 스캔 회로에는 256채널 PD Array IC (Hamamatsu G11620)를 이용하여 Reset, Offset, Clock을 설정할 수 있도록 구성하였다. Fig. 3에는 스캔 시퀀스 로직을 나타낸 블록도이다. 또한 정확한 측정을 위해 기본 클록을 25 MHz를 사용하였으며, 분주(Pre-scaler) 로직을 이용하여 스캔 속도를 설정할 수 있도록 하였다. 분주기에서는 분주된 클록을 256채널 PD Array IC에 입력하고, 이 카운터 값에 따라 시퀀스가 이루어지도록 구성하였다.

파장 스캔 검출 회로는 256채널 PD Array IC의 Reset과 CLK (Clock) 시퀀스의 설정에 따라 Trig 신호가 발생되는데, 이때 Trig

Fig. 3 Block diagram of IbSen I-Mon 256 ch wavelength scanning system

Fig. 4 Pulse timing diagram of 256 ch. PD array IC (Hamamatsu G11620)

신호의 출력에 따라 256채널의 PD에 입사된 광 파위가 아날로그 형태로 출력된다. 이 신호를 16Bit ADC에서 측정하여 RAM (Random access memory)으로 저장하고, 측정된 256개의 광 파워 값을 프로세서 모듈과의 외부 인터페이스를 통해 GUI로 전송한다. 파장 스캔이 종료되면 프로세서 모듈에서는 유효한 데이터 값을 판단하기 위해 프로세서에서 연산하고 판단하여, 최종 결과 값을 프로세서의 외부 인터페이스를 통하여 모니터에 출력되고 저장한다. 따라서 Fig. 4은 신호의 타이밍 다이어그램으로 그림 (a)에서 보는 것과 같이 256채널 PD Array IC에서 입사되는 광 신호를 Intag Time 동안 받아들인 측정값을 CLK와 Reset 펄스 신호를 제어하여 파장 스캔하고 검출하였다. 또한 (b)에서 보는 것과 같이 정확한 측정을 위해 PD에 남아있는 전류의 방전을 위해 Reset을 신호를 입력하여, 남아있는 전류값을 방전하게 하였다. 그리고 PD 특성에 따른 노이즈 신호 측정 방지를 위하여 하드웨어에서 Offset값을 설정할 수 있도록 하여 암 전류 측정을 제한하도록 하도록 설계하였다.

2.4 광원(SLED)

광대역 광원으로 사용한 SLED는 Exalos 사의 EXS210019-03 모델인 Butterfly package를 사용하였다. SLED 내부에는 온도 센서와 열전 소자(Thermoelement, TEC)가 내장되어 있어 안정된 광원 출력을 위하여 전류 바이어스 제어 회로와 온도제어 회로를 구성하여 SLED의 온도에 따른 전류를 제어할 수 있도록 설계 하였다. Fig. 5은 사용된 SLED의 출력 파장에 대한 특성 그래프를

Fig. 5 Optical spectrum of SLED (Measured power according to wavelength)

나타내었으며, 인터로게이터에서 사용한 파장 대역은 1,525 ~ 1,570 nm의 영역을 사용하였다.

2.5 전류 바이어스 회로

SLED의 출력 광원 안정화를 위해 사용한 전류 바이어스 회로는 OP-AMP (OP279GS), TR (MJD3055)와 주변 회로를 설계하여 회로를 구성하였다. Fig. 6 에서 보는 것과 같이 R_s (BIAS_SET)에 10 kohm의 볼륨 저항을 이용하여 전류를 조절하면 최대 200 mA까지 전류를 제어할 수 있게 설계 하였으며, LD (Laser diode) Enable에 스위치를 이용하여 레이저 다이오드에 인가되는 전류를 켜거나 끌 수 있도록 하였다. 이 회로는 SLED의 전류 바이어스를 설정하기 위해 사용하였다. SLED 내부의 레이저 다이오드의 전류를 측정하기 위해 차동증폭기(INA118)를 사용하였으며, 회로의 Shunt 저항은 10 ohm으로 차동 증폭기의 게인 조절 저항은 연결하지 않았다. 따라서 식 (1)에 의해 저항 값에 따라 증폭률은 결선을 연결하지 않았으므로 1:1로 출력되어 전류 바이어스를 조절할 수 있도록 하였다.

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G}$$

(1)

Fig. 6 Schematic diagram of current bias circuit

Fig. 7 Schematic diagram of temperature control circuit

2.6 온도 제어 회로

광원으로 사용한 SLED는 파장 안정화를 위해서 일정한 온도를 유지시켜 주어야 한다. SLED의 온도 제어는 펠티어 효과(peltier-effect)를 이용해 TEC에 공급되는 전류를 조절하므로 작은 물체에 높은 정밀도로 온도를 제어하는데 유용하다. 그러므로 SLED 내부에는 온도 측정을 위한 10 kΩ / 25℃의 온도센서(TH)와 열전 소자가 내장되어있다. Fig. 7에서 보는 것과 같이 온도 조절을 위해 MAXIM사의 MAX8521 (Smallest TEC power drivers for optical modules)IC를 이용하여 SLED 내부에 있는 열전 소자에 공급되는 전류(V_{TECV})를 조절하였으며, 실시간 온도 제어에 필요한 온도 값 측정을 위해 MICREL사 MIC7122YMM (Rail-to-rail dual op amp)을 이용하여 적분기 회로를 설계하였다. 따라서 SLED의 내부의 온도를 25.0℃로 일정하게 유지시켜 안정된 광원이 출력되도록 설계 하였다.

3. 실험 및 고찰

인터로게이터의 신뢰성 시험을 위해 네 가지 항목(파장 반복성, 파장 안정성, 파장의 측정 범위, 외부 온도에 따른 인터로게이터의 동작 특성)으로 나누어 시험을 실시하였다. Fig. 8에서 보는 것과 같이 성능 시험을 실시하기 위하여 파장 가변레이저 소스(Agilent 8164B light wave multi channel system)를 사용하여 시험을 실시하였다. 파장가변 레이저 소스는 주파수별 파장 광원을 생성하여, 인터로게이터에 입력시키는 장비이며, 이때 인터로게이터에서는 입력되는 광원의 파장을 GUI를 통하여 측정하고, 그 값을 모니터를 통하여 확인하여 성능 검사를 실시하였다.

첫째 파장 반복성은 인터로게이터에 주파수별 파장을 반복적으로 입력하였을 때 정확한 광원 측정이 이루어지는 것을 확인하기 위해 실험을 실시하였다. 시험 방법으로는 파장가변레이저 소스를

Fig. 8 Experimental set-up of fabricated interrogator

Fig. 9 Wavelength repeatability characteristics of interrogator

Fig. 10 Wavelength stability characteristics of interrogator

이용하여 5회에 걸쳐 5개의 파장(1,535 nm, 1,540 nm, 1,545 nm, 1,550 nm, 1,555 nm)을 차례로 인터로게이터에 입력하고, 측정되는 값을 GUI에서 검출 값으로 확인하였다. Fig. 9에서 보는 것과 같이 파장 반복성을 측정한 결과 1,535 nm, 1,540 nm, 1,545 nm는 0.001 nm의 파장 변화가 일어났으며, 나머지 2개의 파장(1,550 ~ 1,555 nm)은 그래프에서 보여주는 것과 같이 일정하게 측정되는 것을 확인하였다.

둘째 시간 변화에 따른 파장 안정성을 알아보기 위하여 하나의 파장을 3분 간격으로 측정하면서 1시간씩 5개의 파장을 차례대로 측정하였다. Fig. 10는 파장 안정성 측정한 그래프이다. 그 결과 1,540 nm와 1,545 nm의 파장에서만 0.001 nm의 파장 변화를 나타내었고, 나머지 3개의 파장들은 일정하게 측정되는 것을 확인하였다. 따라서 파장 안정성은 1 pm (Picometer)의 안정된 측정을 확인하였다.

셋째 측정되는 광 파워의 측정 범위를 알아보기 위해 파장가변 레이저 소스를 이용하여 1,525 nm~1,570 nm까지의 주파수 대역을 인터로게이터에 입사하여 GUI에서 검출되는 파장영역을 확인하였다. 그 결과 Fig. 11와 같이 파장 스캔 범위는 1,525.325 nm ~ 1,569.742 nm로 총 44.4 nm의 대역을 검출할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 11 Detectable wavelength range

Fig. 12 Temperature test set-up for interrogator

Fig. 13 Measured temperature range of interrogator

넷째 외부 온도에 따른 인터로게이터 동작 특성을 알아보기 위해 Fig. 12과 같이 인터로게이터를 항온 온도 시험기 안에 설치하고, 파장 가변 레이저 소스를 이용하여 1,545 nm의 파장을 인터로게이터에 입력하여 주변 온도에 따른 파장 측정값 변화를 확인하였다. 항온 온도 시험기의 작동은 0~70°C까지 하였고, 10°C 가격으로 30분간씩 측정하였다. 그 결과 Fig. 13에서 보는 것과 같이 인터로게이터의 주변 온도에 따른 파장 특성을 확인할 수 있었다. 따라서 인터로게이터의 동작 특성은 0~60°C까지는 0.061 nm의 파장 변화가 일어났으며, 이후 60~70°C에서는 0.08 nm의 파장 변화가 일어나는 것이 확인되었다. 하지만 인터로게이터의 동작에는 이상이 없었으며 차후 내부 온도를 측정하는 프로그램을 온도에 따른 보상 값으로 취해주면 파장 변화를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 풍력발전기 블레이드 처짐 측정을 위한 다중화 센서 탐촉자의 동작 및 측정을 하기 위한 인터로게이터를 개발을 위해 광원 및 분광모듈을 설계하고 제작 하였다. 따라서 인터로게이터의 파장측정 반복성과 안정성 특성을 확인한 결과 1 pm 이내의 매우 안정된 광원 측정이 이루어지는 것을 확인하였고, 파장 스캔범위가 44.4 nm영역을 측정할 수 있음을 확인하였다. 이것의 FBG 센서가 2 nm의 영역으로 제작되어지면 20개 이상의 센서를 측정할 수 있는 시스템으로 확장이 가능함을 확인하였다. 그러나 외부 온도에 따른 장비의 온도 시험 결과 0~70°C까지 총 0.141 nm의 파장 변화가 있었으나 이것은 차후 인터로게이터 내부의 온도 측정 프로그램에서 보상을 하면 오차를 줄일 수 있을 것으로

판단된다. 그러므로 제작한 인터로게이터가 FBG 센서를 이용한 센서 시스템에 활용할 수 있음을 확인하였으며, 향후에는 풍력발전기 블레이드에 인터로게이터를 설치하였을 때 발생하는 진동, 충격 및 외부 환경에 대한 영향을 파악하여, 문제점들을 해결하고자 하며, 특히 주변온도에 따른 장비의 운용에서 0°C 이하에서도 인터로게이터를 사용할 수 있도록 장치 내부에 히터(Heater)등을 설치하는 방안도 검토 중이다. 또한 다중화 센서 탐촉자와 제작된 인터로게이터를 군산 풍력발전소에서 가동 중인 풍력발전기 제 2호기 750 Kw급의 블레이드에 설치하여 실증 실험을 실시할 예정이며, 측정된 데이터 분석을 통하여 풍속에 따른 블레이드의 하중 및 처짐 발생 영향을 확인해 보고자 한다.

후 기

이 연구는 2012~2013년도 에너지 기술 평가원에서 추진하는 에너지 기술개발사업에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] WWEA Head Office, World Wind Energy Association, 2010, viewed 6 March 2014, <http://www.wwindea.org/home/images/stories/worldwindenergyreport2009_s.pdf>.
- [2] Paquette, J. A., Veers, P. S., 2007, Increased strength in wind turbine blades through innovative structural design, European Wind Energy Conference EWEC.
- [3] Ciang, C. C., Lee, J. R., Bang, H. J., 2008, Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods, Meas. Sci. Technol. 19:12 122001-122021.
- [4] Kwon, I. B., 2005, Structural Health Monitoring Using fiber Optic Sensors, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing 25:5 400-404.
- [5] Lopez-Higuera, J. M., 2002, Handbook of optical fiber sensing technology John Wiley & Sons LTD., New York
- [6] Zhu, F., Yang, R., Wang, L., Yu Y. S., Chen, Q. D., Sun, H. B., 2012, Laser-processing of transparent solid materials for advanced photonic device applications, Proceedings of the International Conference of Manufacturing Technology Engineers 37-41.
- [7] Jung, D. W., Kwon, I. B., Choi, N. S., 2005, Fabrication of a Temperature-Compensating FBG Sensor for Measurement of Mechanical Strain, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing 25:5 356-361.
- [8] Koh, J. I., 2004, Development of fiber bragg grating sensor system for

the simultaneous measurement of strain and high-frequency vibration in composite structures, Doctorate Thesis, KAIST, Republic of Korea.

- [9] Ryu, C. Y., 2001, Research Trend in Smart Structures Using Fiber Optic Sensors, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing* 21:3 319-329.
- [10] Micron optics, Inc., n.d., viewed 6 March 2014, <http://www.micronoptics.com/products/sensing_solutions/instruments/index.php>.