

## 무인 항공기를 위한 저가형 FBG 인터로게이터 설계

# Low-cost Fiber Bragg Grating Interrogator Design for Unmanned Aircraft

홍재범<sup>1</sup> · 홍교영<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>(주)파이버피아

<sup>2</sup>한서대학교 대학원 항공시스템공학과

Jae-Beom Hong<sup>1</sup> · Gyo-Young Hong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Fiberpia Co. Ltd, Daejeon, 34026, Korea

<sup>2</sup>Department of Aviation system Engineering, Hanseo University, Chungcheongnam-do, 32158, Korea

### [요 약]

복합 소재는 금속보다 가벼운 특성을 가져 경량화가 필수인 항공 산업에 널리 사용되고 있다. 하지만 복합소재는 생산 공정 중 내부 보이드 형성, 접착제 혼합 불량, 미접착 부분 발생 등 결함 요소가 발생할 수 있고, 저 에너지 충격에 의한 미세균열 및 층간분리가 발생할 위험이 있다. 그러므로 구조물 손상검사가 필수적으로 요구된다. 이에 FBG를 이용한 구조 건전성 모니터링이 주목받고 있다. FBG는 기존의 전기적 센서에 비해 전기적 노이즈 영향을 받지 않고 부식에 강하며 멀티플렉싱이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 FBG를 계측하는 인터로게이터는 대형 구조물 계측을 전제로 만들었기 때문에 가격이 고가이며, 크기가 큰 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 광 스위치와 WDM필터, LTF를 이용해 무인항공기나 소형항공기에 사용할 수 있도록 저가형 인터로게이터를 설계하여, 기존의 고가 인터로게이터와 비교를 진행하였다.

### [Abstract]

Complex materials are widely used in aviation industries where lightweighting is essential because they have lighter properties than metals. However, composite materials can cause defects such as internal void formation, poor adhesive mixing, and non-adhesive parts during the production process, and there is a risk of micro-cracking and interlayer separation due to low energy impact. Therefore, a structural damage test is essential. As a result, structural integrity monitoring using FBG is drawing attention. Compared to conventional electrical sensors, FBG has the advantage of being more corrosion-resistant and multiplexed without being affected by electrical noise. However, interloggers measuring FBG are expensive and have a large disadvantage because they are made on the premise of measuring large structures. In this paper, low-cost interloggers were designed for use in unmanned or small aircraft using optical switch, WDM filter, and LTFs, and compared to conventional high-priced interrogator.

**Key word** : FBG, Interrogator, Sensor, Optical sensor, Personal air vehicle.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.6.465>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

Received 2 November 2020; Revised 16 December 2020  
Accepted (Publication) 24 December 2020 (30 December 2020)

\*Corresponding Author, Gyo-young Hong

Tel: +82-41-671-6232

E-mail: kiathgy@hanseo.ac.kr

## 1. 서론

복합소재 (composite material)는 2개 이상의 소재를 조합한 각각의 소재가 가지는 장점을 이용한 개별 소재보다 월등한 기계적 또는 기능적 물성을 가지도록 만들어진 소재를 말한다. 복합소재는 기존의 금속 소재에 비해 강하고 가벼운 특성을 가져 기존 금속구조물을 대체하여 이용이 점차 확산되고 있다[1].

복합소재는 뛰어난 장점을 바탕으로 항공기에 적용되지만, 복합소재 적층 중 접착제 내부의 보이드 생성, 미접착 부분 발생과 같은 결함요소가 발생할 수 있고, 저 에너지 충격에 의해 육안으로 검출하기 힘든 미세균열 및 층간 분리가 적층판 내에서 발생하게 된다[2]. 실제로 2003년 복합소재를 사용한 태양광 발전 항공기인 Helios가 비행 중 날개가 손상되어 추락한 사례가 있다. NASA 연구 보고서에서는 항공기 운항 중 여러 포인트에 부가된 하중이 손상의 핵심 원인으로 보고 있다[3].

이로 인해 복합소재는 구조물의 손상검사가 필수적이다. 구조물 손상검사는 구조물의 수명과 부품교체 시기 결정, 안전 확보, 손상원인 분석을 통해 운항 상태 및 제조 조건을 개선을 위해 이용된다. 특히 항공 분야에서 이러한 문제는 항공기의 안전을 저하시키고 비파괴검사와 같은 주기적 검사를 요구하므로 많은 비용 및 시간이 필요하며 결과적으로 항공기의 가동률 낮추게 된다. 구조 건전성 모니터링 (SHM; structure health monitoring)을 사용하여 검사 비용 및 시간을 절감하고 항공기의 가동률을 높이는데 많은 연구가 진행 중이다. 최근 구조 건전성 모니터링 연구에 여러 장점이 있는 광섬유 브래그 격자 (FBG: fiber Bragg grating)를 사용한 구조 건전성 모니터링 기술 연구가 진행되고 있다. FBG의 경우 파장 (Bragg wavelength) 변화를 통해 변형률(strain), 온도(temperature) 등 다양한 센싱 정보 측정이 가능하다. FBG는 기존 전기적 센서와 비교해 내구성이 우수하고 전자기적 간섭 영향이 없다. 또한, 장거리 전송 시, 적은 손실률을 가지고 하나의 광섬유에 여러 개의 격자를 사용할 수 있어 멀티플렉싱이 가능해 경제적이다 [4]. Hyunseok Kwon은 12개의 FBG를 소형항공기 양쪽 날개에 탑재해, 비행 중 받는 하중에 관한 연구를 진행하였고, K. Chandler는 소형 항공기 동체와 날개에 인터로게이터와 FBG를 탑재해 항공기의 온도와 스트레인을 측정하였다. 이와 같이 안전검사가 중요한 항공 분야에서 FBG를 이용한 구조 건전성 모니터링에 관한 연구가 국내외에서 활발하게 진행 중이다. FBG를 이용한 구조 건전성 모니터링은 항공기뿐만 아니라 드론 등 다양하고 소형화된 분야에서 활용 범위를 넓히고 있다. 하지만 시중 대부분의 FBG 인터로게이터는 대형 구조물을 위해 설계되어, 넓은 파장 검출이 가능한 능동 검출 방법을 사용한다. 하지만 능동 검출 방법의 주 소자인 파장 가변필터는 고가이다[3][5][6]. 수동 검출 방식은 구성이 간단하고 저가 구성할 수 있다. 수동 검출 방식은 FBG 센서 한 개를 검출하기 위해 한 개의 수동형 소자와 한 개의 PD (photodiode)를 사용해야 단점이 있다.

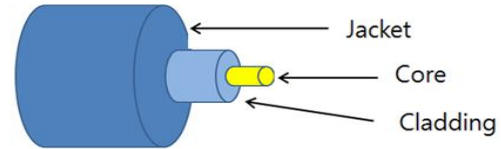


그림 1. 광섬유 구성도  
Fig. 1. Fiber optic composition.

본 논문은 고가인 이유로 소형항공기, 무인항공기에 적용하기 한계가 있던 FBG 인터로게이터를 LTF (linear transmittance filter)와 WDM (wavelength division multiplexing) 필터, optical switch를 조합해 소형 항공기 및 무인 항공기에 적용할 수 있도록 저가형 FBG 인터로게이터를 설계하였다.

## II. FBG 원리

### 2-1 광섬유

광섬유는 그림 1과 같이 빛의 밀도가 높은 매질에서 낮은 매질로 전달 시 경계면에서 전반사 발생하여 빛이 밖으로 나가지 않는 원통 구조로 구성된다. 광섬유 중앙에 높은 밀도를 가진 코어와 코어를 둘러싸고 있는 낮은 밀도 매질을 가진 클래딩, 충격으로부터 보호하는 재킷으로 구성되어 있다. 코어와 클래딩의 주성분은 유리로 구성되고 재킷은 아크릴이나 폴리머로 구성된다. 빛은 코어를 통해 전달되며, 빛의 손실이 없도록 코어에서 클래딩으로 전반사가 이루어진다[7].

### 2-2 광섬유 브래그 격자

FBG 센서는 불순물을 첨가한 코어에 UV(ultra violet) 레이저를 조사해 주기적 굴절률 변화를 만드는 격자를 생성한다. 코어에 새겨진 격자 주기에 특정한 파장이 반사되는 원리를 사용한다. 그림 2는 광섬유 브래그 격자 센서의 구조와 원리를 보여준다. 브래그 격자 센서는 광대역 스펙트럼을 광섬유에 입사해 브래그 조건에 의해 결정된 특정한 파장이 광섬유 격자에 반사되고 나머지 파장은 통과하게 되는 원리다. 그림3은 광 스펙트럼 분석기를 이용해 확인한 FBG의 파장 변화를 보여준다. 광섬유 격자에 반사되는 특정한 파장을 반사 파장이라 한다. 식 (1)은 브래그 조건을 의미한다[4].

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

여기서  $\lambda_B$ 는 브래그 파장,  $n_{eff}$ 는 광섬유 격자의 유효 굴절률,  $\Lambda$ 는 격자 간격이다.

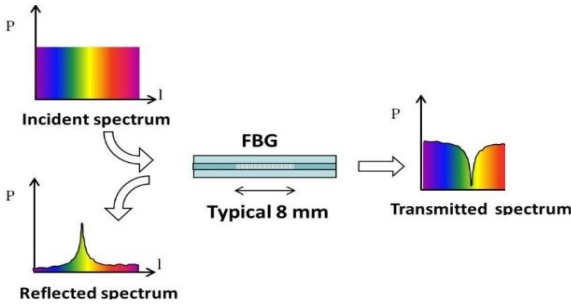


그림 2. FBG 센서  
Fig. 2. FBG sensor.

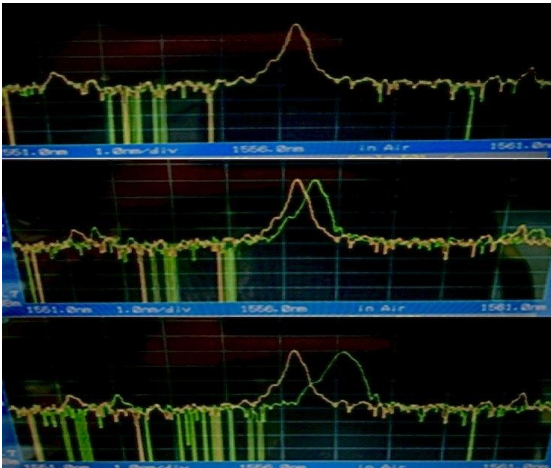


그림 3. FBG 파장 변화  
Fig. 3. FBG wavelength variation.

식(1)에서 브래그 조건에 따른 격자에 반사되는 브래그 파장은 격자 간격과 유효 굴절률의 함수임을 알 수 있다. 격자 간격과 유효 굴절률의 주기는 온도와 변형률의 함수로 광섬유 브래그 격자에 온도, 변형률이 가해지면 브래그 파장이 변화한다.

따라서 격자 간격과 유효 굴절률의 변화량은 브래그 격자에 가해지 온도, 스트레인과 같은 외부 물리량으로 표현할 수 있다. 이는 식(2)으로 나타낸다[19].

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - p_e)\epsilon + (\alpha_A + \alpha_n)\Delta T \quad (2)$$

$p_e$  : 광탄성 상수

$\epsilon$  : 광섬유 격자에 가해진 스트레인

$\alpha_A$  : 광섬유의 온도에 따른 팽창 계수

$\alpha_n$  : 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화

### III. FBG 인터로게이터의 종류

#### 3-1 Fabry-Perot 파장 가변필터를 이용한 복조

Fabry-Perot 파장 가변필터는 전압으로 공진기 간격을 조절하여 파장이 변화하는 원리를 사용한다. 파장 가변필터에 투과되는 파장과 FBG 반사 파장이 일치할 때, 출력이 최대가 되는 원리를 사용한다. 주기적 램프 파형의 전압을 파장 가변필터에 가해 선형적인 투과 파장을 변화시키고 파장대를 스캔하여 FBG 반사 파장을 찾아낸다. 넓은 파장의 스캐닝이 가능해 다점 측정에 유리한 장점이 있지만, Fabry-Perot 파장 가변필터 가격이 고가라는 단점이 있다. 그림 4는 Fabry-Perot 파장 가변필터를 사용한 복조 구성이다[8],[9].

#### 3-2 선형 필터를 이용한 복조

선형 필터를 이용한 복조는 파장의 변화에 따라 선형적으로 투과율이 변화되는 필터를 사용해 FBG에 가해진 물리량의 변화를 감지하는 방법이다. 저렴한 구조를 가진다는 장점이 있지만, 다점 측정이 불가능하고 넓은 파장 범위를 측정하지 못하는 단점이 있다. 그림 5는 선형 필터를 이용한 복조 구성이다 [8],[9].

### IV. 저가형 인터로게이터 설계

상용 인터로게이터의 경우 소형 OSA (optical spectrum analyzer)나 tunable laser를 이용한 복조 방법을 사용한다. 소형 OSA, Tunable laser의 경우 소자 하나의 가격은 최소 수 천 달러에 형성되어 있어, 인터로게이터의 가격은 고가에 형성되어 있다. 본 논문에서는 LTF를 설계, 인터로게이터에 사용되는 총 소자의 가격을 수 백달러로 절감하여, 상용 인터로게이터 대비 1/3 이하 수준으로 가격을 절감 하였다[10]. 인터로게이터의 구성은 그림 6과 같이 광대역 신호를 생성하는 BLS와 FBG 센서들과 광 스위치로 구성된 FBG sensor array, CWDM (coarse wavelength division multiplex)필터와 LTF와 PD로 구성된 optical process, ADC (analog-to-digital converter)로 구성된 data process로 구성된다. SLED (super luminescent diode)에서 생성된 광대역 신호는 circulator를 거쳐 광 스위치를 통해 채널 별로 FBG sensor array에 전달된다. WDM 처리한 FBG 센서의 반사 파장은 광 스위치와 circulator를 거쳐 CWDM 필터로 전달되어 측정하고자 하는 두 개의 파장으로 분해된다. 분해된 파장은 커플러를 통해 나뉘지고, LTF를 통과한 PD와 레퍼런스 PD로 전달되어 전기신호로 변환된다[11].

### V. 스트레인 실험 구성

스트레인 실험 구성과 외팔보 시편 제작은 그림7과 같다.

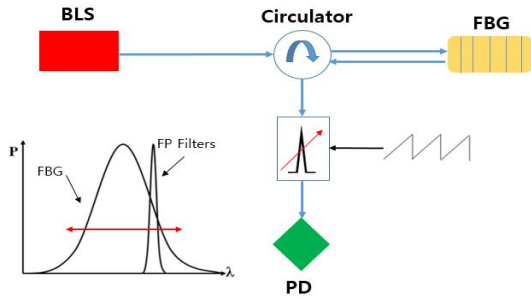


그림 4. Fabry-Perot filter를 이용한 복조  
Fig. 4. Demodulation with Fabric-Perot filter.

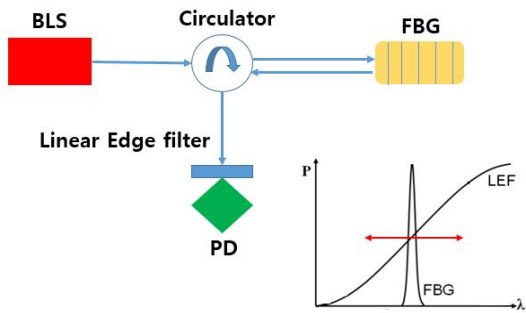


그림 5. 선형 필터를 이용한 복조  
Fig. 5. Demodulation with linear filter.

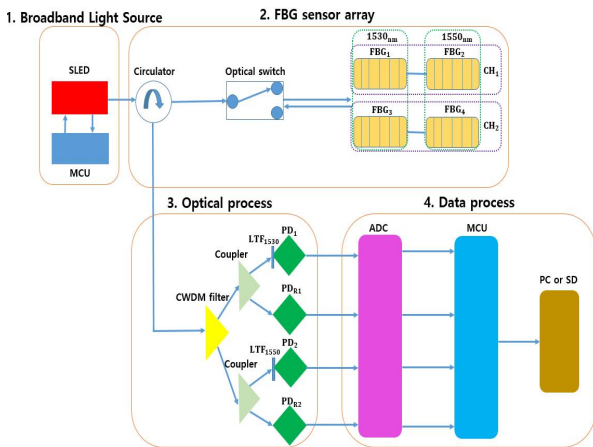


그림 6. 제작 인터로게이터 구성도  
Fig. 6. Fabrication interrogator configuration diagram.

CFRP(carbon fiber reinforced plastic) 시편을 제작하였고 표 1은 제작된 CFRP의 물성 표이다. FBG 센서는 용착을 통해 WDM 상태로 CFRP 시편에 평행하게 thermo epoxy를 이용해 제작하였다. 실험은 두 가지로 진행하였는데 첫 번째는 CFRP 한쪽을 고정해 외팔보로 구성하고 50 g ± 3 mg 내외의 오차를 갖는 M1

등급 분동 4개를 이용해 50 g, 100 g, 150 g, 200 g 하중을 반대쪽에 가하였다. 동일하게 상용 인터로게이터에도 같은 실험을 진행해 계측 값을 비교하였다. 두 번째 실험은 1 kHz의 샘플링 속도로 50 g의 분동을 떨어뜨려 CFRP가 흔들리는 진동을 측정하였다. 표 2는 상용 인터로게이터의 제원표이다.

표 1. CFRP 물성치  
Table 1. CFRP material value.

Width	30mm
Length	500mm
Height	3mm
Tensile modulus	6380kg/mm <sup>2</sup>
Tensile strength	204kg/mm <sup>2</sup>
Density	1.54g/cm <sup>3</sup>

표 2. 상용 인터로게이터 제원  
Table 2. Commercial interrogator specification.

Wavelength range	1510nm - 1595nm
Wavelength accuracy	< 20pm
Wavelength repeatability	< 3pm
Channel	8
Maximum measure frequency	1600/N Hz
Connector Typ.	FC/APC
Weight	5kg

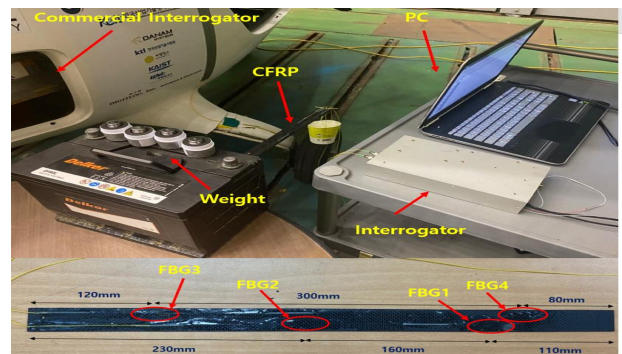


그림 7. 실험 구성  
Fig. 7. Experimental configuration.

## VI. 실험 결과

그림 8은 상용 인터로게이터와 저가형 인터로게이터의 계측 값을 비교한 그림이다. x축은 샘플 개수를 의미하고 y축은 스트레인을 의미한다. 상용 인터로게이터의 스트레인 값과 제작한 저가형 인터로게이터의 스트레인 값은 유사한 결과를 보이며, 무게가 일정하게 증가함에 따라 인터로게이터에서 계측되는 스트레인 값도 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 9는 한 개의 채널에서 측정된 진동 신호이다.

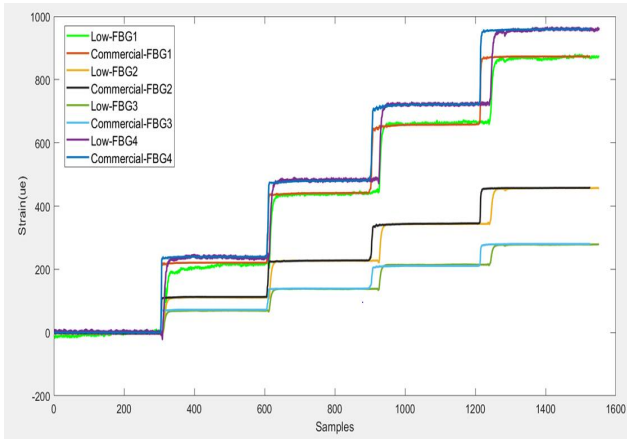


그림 8. 상용 인터로게이터와 스트레인 비교  
 Fig. 8. Comparison of strain with commercial interrogators.

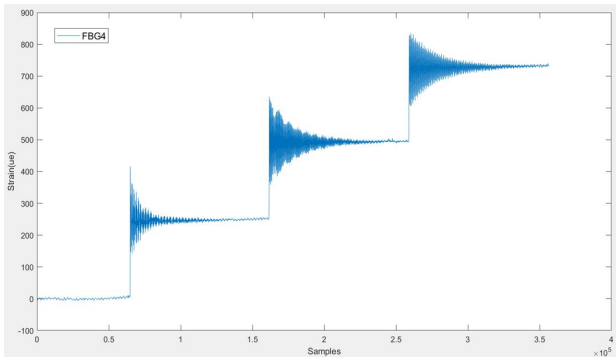


그림 9. 진동 실험  
 Fig. 9. Vibration experiment.

## VII. 결 론

FBG는 스트레인, 온도, 가속도 센서 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 하지만 FBG 센서를 계측하기 위한 인터로게이터의 가격이 고가이므로 다양한 분야에서 활용되기 어렵다. 저렴한 edge 필터를 이용한 FBG 계측이 제안되었으나, edge 필터 같은 수동형 필터의 경우 필터 한 개 당 하나의 FBG만을 계측할 수 밖에 없어, 다점 측정이 어렵다는 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 광 스위치와 WDM 필터를 사용하여 LTF 필터가 계측할 수 있는 FBG 센서의 개수를 늘려 효율적인 탐지가 가능하게 하였다. 비교 결과 상용 제품과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이를 통해 고가인 이유로 특수한 분야에서 한정적으로 사용되던 FBG를 좀 더 다양한 분야로 확대할 수 있을 것으로 예상된다. 추 후 인터로게이터 소형화 연구를 진행하여, 항공 분야에서 소형 항공기, 차기 군단급 무인기와 같은 중대형 무인기와 PAV(personal air vehicle)의 구조 건전성 모니터링에 활용될 것으로 기대한다.

## Acknowledgement

이 논문은 2020년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원-산업용 무인비행장치 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.N0002431)

## References

- [1] M. R. Ham, H. S. Choi, and W. J. Choi, "The emergence of composite material aircraft and review of technical," *Korea Association of Defense Industry Studies*, Vol. 16, No. 2, pp. 259-283, Dec. 2009.
- [2] S. W. Park, H. J. Yoon, S. O. Park, J. Y. Song, and C. G. Kim, "Design scheme of FBG sensor system for aircraft application," in *2005 Korea Composite Materials Society Fall Conference*, Daegu: Korea, pp.215-218, Nov. 2005.
- [3] G. H. Lee, A study on structural health monitoring of solar powered aircraft composite wings using fiber bragg grating Sensors, Master's degree, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea, 2013.
- [4] H. S. Shin, Measurement Accuracy Improvement of FBG Sensor in Composite Wings Using SWT, Master's degree, Hanseo University, Chungcheongnam-do, 2019.
- [5] Q. Wu, Y. Semenova, A. Sun, P. Wang, and G. Farrell, "High resolution temperature insensitive interrogation technique for FBG sensors," *Optics & Laser Technology*, Vol. 42, No. 4, pp. 653-656, June 2010.
- [6] G. Kouroussis, D. Kinet, E. Mendoza, J. Dupuy, V. Moeyaert, and C. Caucheteur, "Edge filter technique and dominant frequency analysis for high-speed railway monitoring with fiber Bragg gratings," *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, No. 7, July 2016.
- [7] J. W. Lee, WDM signal processing system using optical fiber sensor, Master's degree, Hoseo university, Chungcheongnam-do, 2002.
- [8] J. H. Kim, Temperature sensor system by using InGaAs PD array for power system monitoring, Master's degree, Chonbuk National University, Jeollabuk-do, 2009
- [9] Y. H. Cho, A FBG temperature sensor for electric power systems using wavelet transform, Master's degree, Chonbuk National University, Jeollabuk-do, 2011
- [10] P. C. Silveira, A. Dante, M. M. Keley, C. Carvalho, R. Allil, R. Mok, L. Garção, and M. Werneck, "Experimental evaluation of low-cost interrogation techniques for FBG sensors," in *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Houston: TX, pp. 1-6, 2018.

[11] J. B. Hong, A Study on interrogator design using optical

switch and WDM filter, Master's degree, Hanseo University, Chungcheongnam-do, 2020.



**홍재범 (Jae-Beom Hong)**

2018년 9월 : 한서대학교 항공전자학과 (공학사)  
2018 9월 ~ 2020 8월 : 한서대학교 대학원 항공기 시스템학과 (공학사)  
2020 9월 ~ 현재 : 파이버피아 연구원  
※ 관심분야 : 광센서, 항공기 시스템, 비행시험, FOD



**홍교영 (Gyo-Young Hong)**

1993년 3월 ~ 2001년 : 대한항공 항공기술연구소 선임 연구원  
2001년 9월 ~ 현재 : 한서대학교 항공전자공학과 교수  
※ 관심분야 : 비행시험, 항공통신, 항공기 시스템