

구조 건전성 모니터링을 위한 광섬유 브래그 격자 센서와 차동법을 적용한 로드셀 개발

Development of Load Cell Using Fiber Bragg Grating Sensors and Differential Method for Structural Health Monitoring

김대현

Dae-Hyun Kim

초 록 광섬유 센서 기술은 기존의 상용 센서의 어려움을 극복할 수 있어 전자기학 잡음과 전기 쇼크의 영향이 강한 폭발환경에서도 충분히 사용이 가능하다. 최근 이러한 장점들로 인해 여러 종류의 광섬유 센서들이 활발히 연구 개발되고 있다. 또한 비파괴검사/평가 분야로써 구조 건전성 감시를 위한 광섬유 센서의 다양한 적용 연구 분야가 존재한다. 그러나 로드셀과 같은 종류의 센서들은 상대적으로 상용화가 미흡한 실정이다. 본 논문에서는 광섬유 브래그 격자 센서를 사용한 광섬유 로드셀을 보여준다. 본 로드셀의 형상은 링크 타입이고, 세 개의 광섬유 브래그 격자 센서를 사용하여 세 지점의 변형률을 각기 측정한다. 특히 이들 변형률은 온도와 같은 동상 잡음을 제거하기 위해 차동법을 사용하여 신호처리 된다. 더 나아가 본 로드셀의 감도, 선형성 그리고 해상도를 인장실험을 통해 성공적으로 검증하였다.

주요어: 로드셀, 광섬유 브래그 격자 센서, 차동법, 선형성

Abstract Emerging fiber optic sensor technologies have shown great potential to overcome the difficulties associated with conventional sensors. Fiber optic sensors are immune to EM noise and electric shock and thus can be used in explosion-prone areas. Several kinds of fiber optic sensors have been developed over the last two decades to take advantage of these merits. There have also been many field applications of fiber optic sensors for structural health monitoring as NDT/NDE. However, very few sensors, particularly a load cell have been successfully commercialized. This paper presents a load cell using fiber Bragg grating (FBG) sensors. The shape of the load cell is a link type, and three FBG sensors are used for measuring strains at three different points. Especially, these strains are processed with a differential method in order to exclude common mode noise such as temperature. Moreover, the sensitivity, the linearity and the resolution of the load cell were successfully verified from the experiment of tension test.

Keywords: Load Cell, Fiber Bragg Grating Sensor, Differential Method, Linearity

1. 서론

광섬유 센서는 광소자의 성능 향상과 가격 하락으로 인해 변형량, 압력, 가속도, 진동 및 음향과

센서 등의 기존의 센서 시스템을 성공적으로 대체하고 있다. 또한 광섬유 센서는 크기가 작고 민감도가 우수하며 전자기장의 영향을 받지 않는다는 장점으로 인해 여러 분야로의 적용 가능성이 높다

[1,2]. 최근에는 광섬유의 작은 크기와 유연성 때문에 재료내에 삽입이 용이해 파손 거동이 복잡한 복합재료의 재료/구조 건전성 모니터링 등의 연구에 활발한 적용이 이루어지고 있다[3,4]. 특히 간섭형 광섬유 센서의 경우, 동적 응답 특성이 우수하고 민감도가 뛰어나 복합재료의 파손 검출 및 손상 평가 연구에 적극 활용되고 있다. 그리고 앞서 설명했듯이 전자기장에 간섭을 받지 않는 큰 장점으로 인해 전기장의 간섭이 많이 발생하는 발전소 설비 및 관련 구조물의 건전성 모니터링 분야에 활발히 활용되어 현재 비파괴 검사 분야의 핵심적인 센서로 그 역할이 커지고 있다.

본 연구에서 사용하려는 광섬유 브래그 격자 센서(fiber Bragg grating sensor, FBG sensor)의 경우, 변형률과 온도와 같은 인자들을 반사 파장의 변화를 측정함으로써 간단히 측정할 수 있으며 파장 분할 다중화(wavelength division multiplexing, WDM) 기법을 사용함으로써 동시 다점 측정 기술을 쉽게 구현할 수 있다. 이러한 FBG 센서는 변형의 절대량 측정이 가능하고, 출력 신호가 빛의 파장에만 관계하므로 광각도의 변화에 무관하여 시스템 구성이 용이하다. 또한 센서의 출력 신호가 변형에 대하여 선형적이며 광섬유 자체의 강도를 거의 유지하므로 강도 특성이 우수하며, 현재 개발된 광섬유 센서들 중 다점 측정에 가장 효율적으로 사용될 수 있는 센서로 인정받고 있다[5].

본 논문에서는 이러한 장점을 갖고 있는 광섬유 브래그 격자 센서를 이용해 하중을 측정할 수 있는 단축 광섬유 로드셀을 개발하였다. 일반적으로 로드셀의 경우, 하중을 측정하기 위해 로드셀 내부의 여러 지점에서 변형률을 측정해야 한다. 따라서 이때 사용되는 리드(lead)선의 개수도 많아져 보통 로드셀의 연결선은 여러 가닥의 리드선을 포함하게 된다. 그러나 광섬유 브래그 격자 센서를 이용할 경우 하나의 광섬유 선에 여러 개의 센서를 삽입할 수 있고 이를 이용해 로드셀을 개발할 경우 한 가닥의 광섬유만을 광학 시스템에 연결함으로써 로드셀을 사용할 수 있게 된다. 또한 전자기 간섭이 많은 설비 및 구조물의 하중 측정과 같은 상시 감시 시스템 구동시 잡음의 영향을 최소화 시킬 수 있는 하나의 좋은 방법이 될 수 있다. 본 논문에서는 우선 비파괴 검사 분야의 연구자들에게 브래그 격자 광섬유 센서의 이해를 돕기 위해 브래그 격자 센서의 개념과 측정 원리를 자세히 설명하였다. 이를

바탕으로, 광섬유 브래그 격자 센서를 적용한 단순한 형태의 링크 타입 단축 로드셀을 설계 제작하고 이를 소개하였다. 특히 본 연구에서는 온도 변화와 같은 동상 잡음을 효과적으로 제거할 수 있도록 광섬유 브래그 격자 센서로부터 측정된 변형률을 차동법으로 신호처리 하였다. 또한 최소한의 센서 구성이 가능하도록 차동법 구현을 위한 두 개의 광섬유 센서와 편심 발생 검출을 위한 추가 센서 이렇게 총 세 개의 광섬유 센서만을 사용해 로드셀을 성공적으로 설계/제작하였다. 마지막으로 설계와 제작이 완료된 후, 로드셀의 민감도 및 선형성 그리고 해상도를 확인하기 위해 단순 인장 실험을 수행하였으며 이를 통해 로드셀의 성능을 성공적으로 평가할 수 있었다.

2. 광섬유 브래그 격자 센서 시스템

2.1. 광섬유의 구조

광섬유의 구조는 일반적으로 Fig. 1과 같이 코어(core), 클래딩(cladding), 피복(jacket) 부분으로 이루어져 있다. 코어와 클래딩의 주성분은 유리로 구성되어 있으며 이러한 주구조인 코어와 클래딩을 보호하기 위하여 폴리머나 아크릴레이트 등을 사용하여 클래딩 표면을 피복한다. 빛은 광섬유의 코어 부분으로 전파하게 되며 파손실 없이 가장 효율적으로 전파되도록 하려면 코어 부분으로부터 클래딩 부분으로 전반사가 이루어져야 한다. 빛이 광섬유 내부에서 전파될 때 전반사가 발생하기 위해서는 굴절률이 높은 곳에서 낮은 곳으로 전파될 때 발생하므로 일반적으로 코어의 굴절률은 클래딩의 굴절률에 비해 다중모드 광섬유는 1~2%, 단일모드 광섬유는 0.1~0.2% 정도 큰 값을 갖는다. 또한 광섬유는 크게 단일모드(single mode) 광섬유와 다중모드(multi mode) 광섬유로 분류된다. 다중모드 광섬

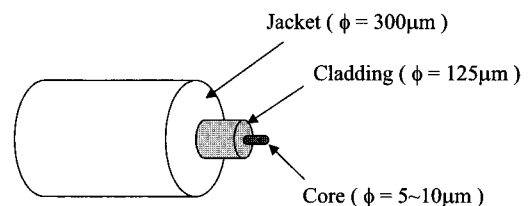


Fig. 1 The configuration of core-cladding type optical fiber

유는 코어의 직경이 50~60 μm 로 단일모드 광섬유에 비해 크고 근거리 통신용으로 사용되며 단일모드 광섬유는 코어의 직경이 4 μm 또는 9 μm 로 매우 작으며 전송 손실이 다중모드 광섬유보다 작기 때문에 장거리 통신이나 센서용으로 많이 사용된다 [6].

2.2. 광섬유 브래그 격자

2.2.1. 광섬유 브래그 격자의 제작 방법

Hill[7]에 의해 제안된 위상 마스크(phase mask) 법으로 광섬유 브래그 격자를 제작하였다. 위상 마스크는 일종의 회절 광학 소자(diffraction optical element)로서 격자 형성용 자외선 빛을 통과시켜 공간에 따른 위상차를 유도하여 자외선 빛의 간섭 무늬를 광섬유 코어 내에 형성시키도록 한 간섭형 마스크이며 이를 이용하면 비교적 쉽게 광섬유 브래그 격자를 제작할 수 있다. 위상 마스크를 이용해 광섬유 격자를 제조할 때에는 광섬유 코어의 유효 굴절률과 위상 마스크에 의한 회절 무늬의 간격에 의해 브래그 반사 파장이 결정된다. 이 때 사용하는 위상 마스크는 Fig. 2와 같이 위상 마스크를 투과한 후 직진하는 성분인 0차 회절광이 위상 마스크의 골과 마루 사이에 π 의 위상차를 가져 상쇄 간섭되어 없어지고, +1차, -1차 회절이 많아 이 두 회절 빛이 서로 보강 간섭을 일으켜 광섬유에 간섭무늬를 형성시킬 수 있게 된다. 홀로그래픽 방법과 비교할 때 위상 마스크를 사용하는 방법은 격자 형성용 자외선 빛의 가간섭성 길이에 관계없이 광섬유 격자를 만들 수 있으므로 저가의 자외선 레이저를 사용할 수 있고, 단순히 하나의 광학 소자를 사용하므

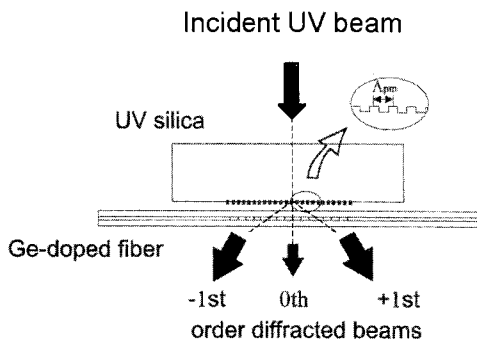


Fig. 2 Grating fabrication method using a phase mask

로 시스템이 훨씬 간단해지며, 보다 안정적으로 광섬유 격자를 만들 수 있기 때문에 광섬유 격자를 대량으로 제작할 수 있다는 장점이 있다[6].

2.2.2. 브래그 법칙

일반적으로 결정 구조를 연구할 때 광자, 중성자, 전자의 회절을 이용하게 되는데 회절은 결정의 구조와 입사선의 파장에 따라 달라진다. 브래그는 결정에 의한 회절 현상을 아주 간결하게 설명하였다. Fig. 3과 같이 격자면 간의 간격이 d 인 평행 격자면을 생각해보면 파동이 지면을 따라 입사했다면 이웃하고 있는 면에서 반사된 파동간의 경로 차는 $2d \sin \theta$ 인데, 여기서 θ 는 입사 방향과 격자면이 이루는 각이다. 인접하고 있는 면에서 반사된 파들 간의 보강 간섭은 경로 차가 파장 λ 의 정수배 일 때 일어나므로 식은 다음과 같다.

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

일반적으로 결정 구조를 연구할 때 광자, 중성자, 전자의 회절을 이용하게 되는데 회절은 결정의 구조와 입사선의 파장에 따라 달라진다. 브래그는 결정에 의한 회절 현상을 격자면이 입사파를 전부 반사한다면 평행 격자면 중 첫 번째 면만이 입사파와 상호 작용하여 모든 파장의 파를 전부 반사하므로 두 번째 면에는 파가 전혀 도달하지 않을 것이다. 그러나 실제로 각 면은 입사파의 $10^3 \sim 10^5$ 정도를 반사할 뿐이다. 따라서 완전한 결정에서는 $10^3 \sim 10^5$ 개의 결정면이 브래그 반사파를 형성하는데 참여하게 된다. 이러한 브래그 법칙에 따르면 광섬유 브래그 격자의 굴절률 변화 주기를 d 라고 하고, 각각의 굴절률 변화면이 광섬유 코어에 수직으로 형성되어 있다면 $\theta = 90^\circ$ 가 된다. 그리고 λ 는 이러한 조건이 맞아 반사가 일어나는 빛의 파장을

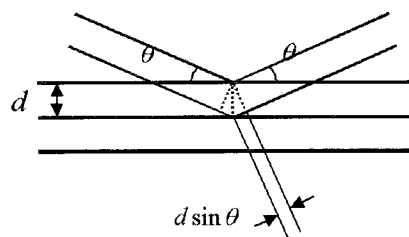


Fig. 3 Light reflecting from gratings

나타낸다. 하지만 빛이 광섬유의 코어를 진행할 때 빛의 경로는 실제의 공간적인 거리와 빛이 진행하는 경로를 이루고 있는 물질의 굴절률의 곱으로 나타내진다. 그러므로 위 식에서의 d 는 $\bar{n}d$ 로 바뀌어야 한다. 여기서 \bar{n} 는 빛이 광섬유 브래그 격자의 한 주기를 진행할 때 느끼는 평균 굴절률이다. 광섬유 브래그 격자의 한 주기는 자외선에 노출되지 않아서 굴절률의 변화가 일어나지 않은 부분과 자외선에 노출되어 굴절률의 상승이 일어난 부분으로 이루어지므로 \bar{n} 는 광섬유 브래그 격자 제작전의 광섬유 원래의 굴절률과 광섬유 브래그 격자 제작 후 상승된 굴절률의 평균값을 나타낸다. 굴절률 변화면이 광섬유 코어의 방향과 수직을 이룰 경우 ($\theta = 90^\circ$) 광섬유 브래그 격자에 적용되는 브래그 법칙은 다음과 같다[6].

$$2\bar{n}d = m\lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

2.3. 광섬유 브래그 격자 센서의 변형을 측정 원리

앞서 설명한 것과 같이 광섬유의 측면에 248 nm 근방 파장의 자외선 레이저를 이용하여 간섭무늬를 형성하면 광섬유 코어의 굴절률은 간섭무늬의 에너지 분포에 따라 주기적으로 변화하며 이러한 광섬유 브래그 격자는 Fig. 4와 같은 구조 및 동작 특성을 가진다.

빛이 진행하는 광섬유의 코어 내에 주기적인 굴절률의 변화가 새겨진 것은 브래그 격자의 역할을 하게 되며 Fig. 5와 같이 광폭 스펙트럼을 광섬유에 입사 시킬 경우 굴절률이 변하는 경계 면에서 빛이 반사하는데 이들 중 다음의 식 (3)과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 의해서 결정된 파장 성분은 보강 간섭을 일으켜 광섬유 격자 부위에서 반사되며 나머지 파장 성분은 통과하게 된다.

$$\lambda_B = 2n_e\Lambda \quad (3)$$

위 식에서 n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률이고 Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(grating period)이다. 위의 브래그 조건에서 보듯이 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이다. 그리고 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이므로 광섬유 브래그 격자에 온도나 변형 등의 외란이 가해지면 이들 값이

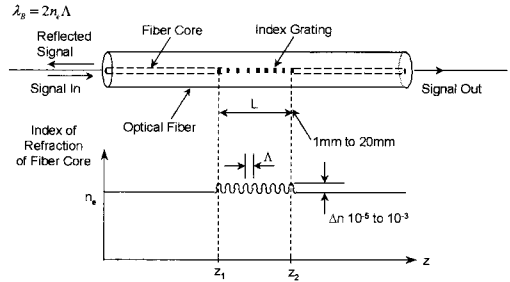


Fig. 4 Fiber Bragg grating and change of index of refraction

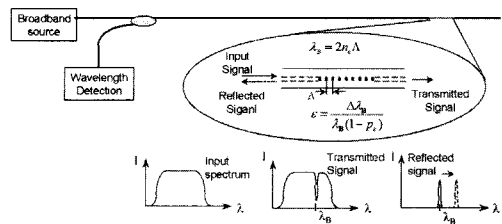


Fig. 5 FBG sensor wavelength-encoding operation

변하여 브래그 파장은 달라진다. 브래그 조건에서 브래그 파장을 전 미분을 취한 후 온도, 변형률과 유효 굴절률, 격자 간격의 식을 대입하면 식 (4)를 얻을 수 있다. 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률을 식 (4)를 통하여 계산해 낼 수 있으며, 이것이 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \zeta)\Delta T + (1 - p_e)\epsilon] \quad (4)$$

여기에서 p_e 는 광탄성 상수(photoelectric constant)이며 다음과 같이 표현된다.

$$p_e = \left(\frac{n^2}{2}\right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (5)$$

식 (4)에서 α 는 광섬유의 온도에 따른 팽창계수(thermal expansion coefficient)이고 ζ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)로서 실리카의 경우 $\alpha \sim 0.510 \cdot 10^{-6}$, $\zeta \sim 8.310 \cdot 10^{-6}$ 정도의 값을 가지므로[8] 온도에 의한 브래그 파장 변화는 대부분 굴절률 변화에 기인한다. 또 식 (5)에서 p_{11} 과 p_{12} 는 변형률 광학 텐서(strain-optic constant)의 성분이며 n 은 코어의 굴절률, ν 는 광섬유의 프와송 비이다.

광탄성 상수 p_e 는 gemanosilicate glass의 경우 대략 0.22의 값을 가진다고 알려져 있으나[9] 광섬유에 따라 다른 값을 가질 수 있으므로 정확한 변형률의 측정을 위해서 이 값의 측정이 요구된다. 식 (4)에서 파장의 변이는 온도의 변화에 의한 것과 변형률의 변화에 의한 것을 모두 포함하고 있는데, 광섬유로 측정 가능한 범위 내에서는 대체로 선형적이다. 본 연구에서와 같이 센서들 간의 온도 차이가 없는 상태에 국한시켜 구조물의 변형을 측정한다면 식 (4)에서 $\Delta T=0$ 으로 둘 수 있고 다음의 식 (6)과 같이 간단하게 변형률과 파장의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{1}{1 - p_e} \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \quad (6)$$

그러므로 변형률은 브래그 반사 파장의 변화량만 측정하면 쉽게 구할 수 있다. 또한 광섬유 브래그 격자의 중심 파장을 서로 다르게 하여 변형을 받을 때도 중첩이 안되도록 서로 다르게 구성하면 하나의 광섬유 선에 여러 개의 브래그 격자 센서를 배열할 수 있다. 그러므로 동시에 여러 지점에서의 측정을 할 수 있어서 다점 측정이 가능해진다[6].

3. 단축 로드셀의 설계 및 제작

3.1. 로드셀 설계

본 논문에서 설계 제작한 광섬유 센서 응용 로드셀은 링크(link) 타입으로 결정하여 로드셀의 형상에 따른 문제의 복잡성을 최대한 단순화시켰다. 또한 링크 타입의 로드셀은 비교적 대용량의 로드셀 제작에 사용되는 형태로서 본 논문에서는 최대 측정 하중을 대략 8 ton 정도로 결정하였다. 그리고 단위 중량에 대한 변형률을 높이기 위해 강성이 비교적 낮은 알루미늄 계열의 듀랄루민 합금(7075)를 사용하여 로드셀을 설계하였다. 이 재료는 강철에 비해 탄성계수가 대략 3배 정도 작아 동일 하중에 대해 변형이 높게 발생하여 센서로 측정된 변형률 또한 높아 측정 해상도를 높일 수 있다. 참고로 사용된 재료의 탄성계수는 72 GPa이고 프와송 비는 0.33, 극한강도는 550 MPa이다. 또한 측정 최대 한도인 8 ton을 유지하면서 피로한도 $sf = 0.4 su = 220 \text{ MPa}$ 이내의 응력이 로드셀에 부과되도록 아래

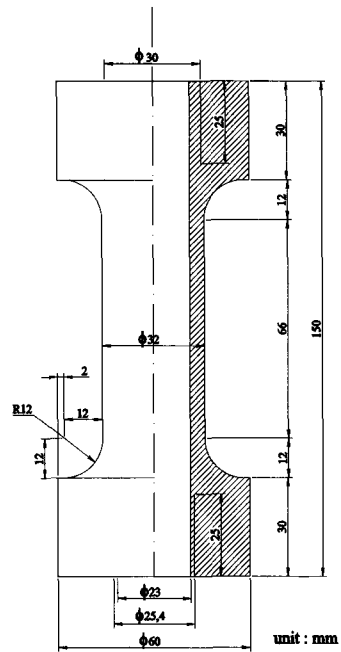


Fig. 6 Drawing of load cell

의 식 (7)과 같이 로드셀의 단면적을 결정하였다. 이는 설계 제작되는 광섬유 센서 응용 로드셀이 피로하중을 견딜 수 있도록 하기 위함이다.

$$A = 80000 \text{ [N]} / 220 \text{ [MPa]} = 364 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (7)$$

실제 로드셀에 부과되는 하중에 따른 변형량을 측정하기 위해 로드셀 중앙에 광섬유 브래그 격자 센서를 부착할 수 있도록 설계하였다. Fig. 6은 위에서 설명한 설계 인자들을 고려해, 본 논문에서 제작한 광섬유 응용 로드셀의 설계 도면을 보여준다. 그림에서 광섬유가 부착되는 중앙 부분의 축방향 길이가 너무 길면 압축하중이 작용할 때 좌굴이 일어날 수 있고, 또한 길이가 너무 짧으면 전달되는 하중이 광섬유센서가 부착된 곳에 균일하게 응력을 전달하지 못한다. 따라서 본 실험에서 제작된 로드셀의 광섬유가 부착된 중앙의 길이를 90 mm로 설계하였다. 이는 실제 이와 같은 로드셀이 좌굴이 생기려면 광섬유 부착 부위의 길이가 약 300 mm 정도 되어야 한다는 점을 고려하여 결정한 수치이다. 그리고 로드셀의 위쪽과 아래쪽은 인스트론의 치구와 결합시키기 위해서 암나사를 새겨 넣었다.

3.2. 로드셀 제작

Fig. 7은 3.1절의 설계에서 결정된 형상에 따라 가공한 실제 링크 타입의 로드셀을 보여준다. 제작된 로드셀에 실제 광섬유 브래그 격자 센서를 부착하기 전에 로드셀의 단면적을 정확히 측정하기 위해 로드셀의 외경과 내경을 측정하였다. 광섬유 브래그 격자 센서 부착 지점을 1번이라 하고 시계방향으로 90도 회전한 지점을 순서대로 2, 3, 4번으로 했을 경우 수직 방향의 중심부분과 중심으로부터 위, 아래로 20 mm 떨어진 지점의 세 부분을 각각 측정한 후 평균을 취하였다. 측정 결과는 Table 1과 같다.

측정 결과, 평균 유효 단면적은 386.73 mm²로 이 경우 로드셀의 용량은 약 8.5 ton이 되며 이는 초기 설계 하중인 8 ton보다 약간 크기 때문에 8 ton용 로드셀로 사용하기에 전혀 문제가 없게 가공되었음을 확인시켜 준다.

변형률 측정 센서로는 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서 3개를 사용하여 차동법으로 동상 잡음을 제거하고 굽힘의 영향을 무시할 수 있도록 구성하였다. 즉, 축 방향으로 두 개의 센서를 서로 반대편에 부착하였고 축 방향과 수직 방향으로 한 개의 센서를 두 개의 축 방향 센서의 중간에 부착하였다. 이러한 센서 부착을 통해, 동일한 하중에 대해 각 센서는 다른 부호의 출력을 발생시킨다.

Table 1 Inner and outer diameters of road cell

	1<->3	2<->4	
	외경[mm]	내경[mm]	면적[mm ²]
Top(2cm)	32.06	23.20	384.53
Middle	32.09	23.15	387.87
Bottom(-2cm)	32.11	23.18	387.78
Average	32.09	23.18	386.73

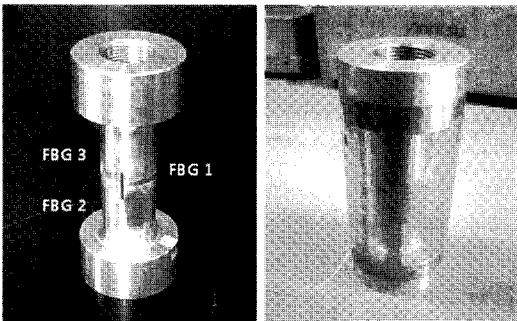
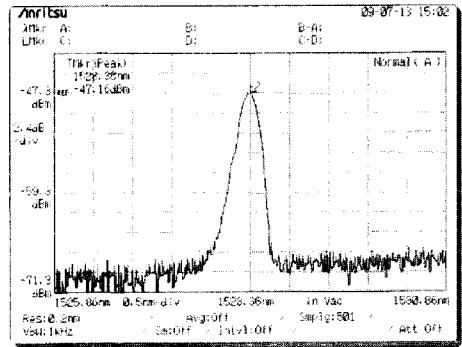
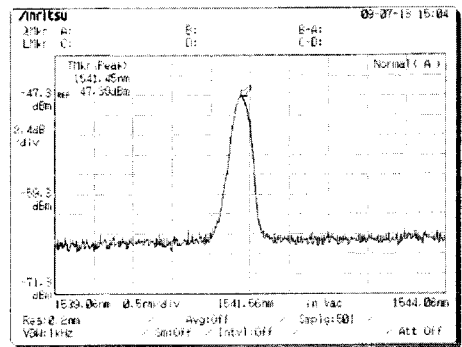


Fig. 7 Load cell using three FBG sensors

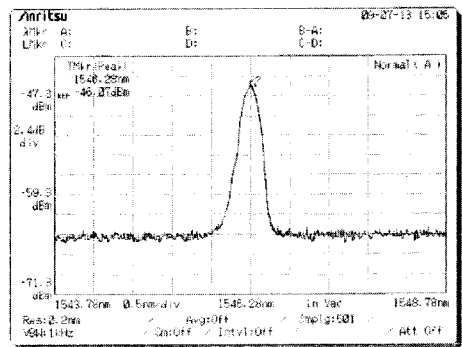
이를 통해 동상 잡음을 보다 효과적으로 제거할 수 있게 된다. 또한 센서 1과 3을 동일 방향으로 부착하고 각 센서의 변형률의 크기와 방향을 실시간으로 관찰하여 압축 하중에 의한 편심 발생 유무도 확인할 수 있도록 하였다. 참고로, 센서의 부착은 M-bond를 사용하여 1차 부착한 후 5분 경화 에폭시로 센서 부위를 보강하였으며 이때 사용된 FBG 센서의 중심 파장은 각각 1528.36 nm, 1541.45 nm, 1546.28 nm이고 스펙트럼은 Fig. 8과 같다.



(a) λ = 1528.36 nm



(b) λ = 1541.45 nm



(c) λ = 1546.28 nm

Fig. 8 Power-spectrum-shapes of three FBG sensors

최종적으로 센서가 부착된 로드셀의 형상은 앞의 Fig. 7와 같다. 그림에서와 같이 브래그 광섬유 격자 센서는 광섬유 한 라인에 제작된 것으로서 로드셀의 특성상 여러 개의 변형을 센서가 사용된다는 점을 고려해 볼 때 이 같은 사실은 광섬유 센서를 이용한 로드셀 제작에 있어 광섬유 센서가 갖는 최대 장점이라고 할 수 있다.

4. 로드셀의 보정 실험

4.1. 실험 장치와 방법

Fig. 9와 같이, 본 논문에서 설계/제작된 광섬유 로드셀을 인스트론(Instron 4482)에 장착하였다. 그리고 장착된 로드셀에 단순 인장 하중이 가해질 수 있도록 스틸 바(steel bar)를 인스트론에 함께 장착하였다.

로드셀에 부착된 광섬유 브래그 격자 센서에서 발생하는 변형량을 측정하기 위해, Fig. 10와 같이 로드셀에 연결된 광섬유를 2절에서 설명했던 측정 방법을 이용한 광학 시스템에 연결하였다. 그리고 광섬유 센서에서 발생하는 변형량에 대한 기준 하중을 측정하기 위해 인스트론에 장착된 기준 로드셀을 준비된 디지털 오실로스코프에 연결하였다.

인스트론의 인장 속도를 분당 1 mm로 고정시키고 일정 변위 제어 방식으로 인장 실험을 수행하였다. 기준 로드셀에서 발생하는 신호는 디지털 오실로스코프를 이용해 5.0 Hz의 속도로 취득하여 GPIB가 장착된 컴퓨터로 저장하였다. 동시에 광섬유 센서 로드셀에 부착된 3개의 광섬유 브래그 격자 센서로부터 취득된 신호는 Fig. 11과 같이 LabView로 작성된 프로그램에 의해 실시간으로 변형률로 변환 및 저장되도록 준비하였다. 프로그램의 전체 레이아웃을 살펴보면 알 수 있듯이, 각 광섬유 센서의 부착 지점을 그림으로 표현하여 센서의 위치를 쉽게 확인할 수 있고 로드셀에 작용하는 하중에 따라 측정되는 센서의 측정 결과를 실시간으로 나타내어 사용자의 편의성을 높였다. 또한 로드셀을 통해 측정되는 최종 하중 역시 디지털과 아날로그 방식으로 동시에 표현되기 때문에 매우 편리하게 센서를 사용할 수 있게 된다.

그리고 기준 하중과 비교되는 유효 변형률(ϵ_{eff})은 로드셀에 부착된 3개의 센서에서 측정된 3개의 변형률을 다음의 식 (8)에 적용하여 얻어진다.

$$\epsilon_{eff} = -\frac{\epsilon_1}{\nu} + \frac{\epsilon_2 + \epsilon_3}{2} \tag{8}$$

여기서 ϵ_1 은 수평으로 부착된 FBG 1 센서에서 측정된 변형률이고 ϵ_2 , 와 ϵ_3 는 수직으로 부착된 FBG 2와 FBG 3에서 각각 측정된 변형률을 말한다. 식 (8)에서와 같이 ϵ_1 은 변형 방향이 다른 두

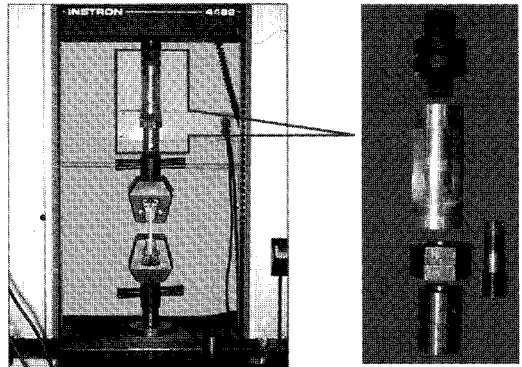


Fig. 9 Installation of load cell onto Instron for tension test

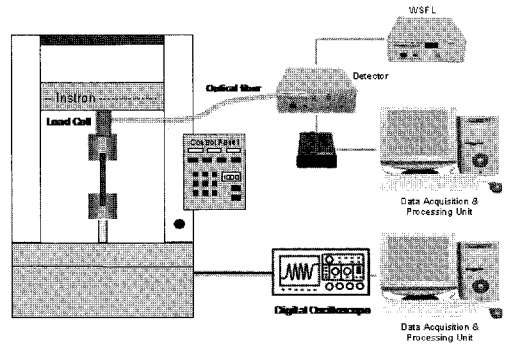


Fig. 10 Schematics of test on calibration of load cell using FBG sensors

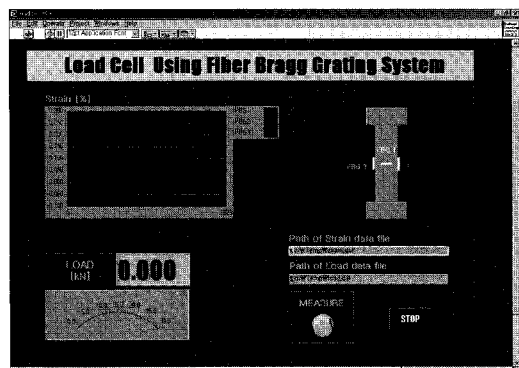


Fig. 11 LabView program for FBG sensor signal processing

변형률과 반대이고 프와송 비(ν) 만큼 작게 발생하므로 위의 식과 같이 음의 부호를 붙이고 프와송 비로 나누어 주었다. 식 (8)에서 정의한 유효 변형률과 기준 하중 사이의 관계를 정확히 찾아내기 위해 동일 실험을 10회 실시하여 평균값으로 관계를 결정하였다.

4.2. 실험 결과

Fig. 12는 기준 하중과 유효 변형률 사이의 관계를 나타내는 그림으로서 기준 하중이 유효 변형률과 선형관계를 갖고 있음을 확인할 수 있다. 그리

$$Y = 139.87 X \quad (9)$$

고 실험 결과, 두 변수의 관계는 구체적으로 식 (9)와 같이 1차 선형식으로 표현될 수 있다.

여기서 Y 는 기준 하중(Ref. load [kN])을 나타내며 X 는 유효 변형률 (effective strain [%])을 나타낸다. 이러한 결과를 바탕으로 개발된 로드셀의 선형성을 성공적으로 검증할 수 있었다. 마지막으로 Fig. 12와 수식 (8)을 바탕으로, 본 로드셀의 민감도는 $13.99 \text{ N}/\mu\text{strain}$ 으로 평가할 수 있으며 또한 최대 해상도 역시 사용된 광섬유 브래그 격자 센서의 최대 해상도가 $5.0 \times 10^{-3} \%$ 임을 고려할 때 0.070 kN 임을 성공적으로 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 광섬유 브래그 격자 센서를 이용해 기존 전자기 센서로 접근이 어려운 구조물의 건전성 모니터링을 위한 광섬유 로드셀을 성공적으로 설계 개발하였다. 광섬유 브래그 격자 센서는 다른 광섬유 센서에 비해 다점 측정이 용이하여 여러 지점에서 변형률을 동시에 측정해야 하는 로드셀 제작에 적합하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 광섬유 브래그 격자 센서를 이용해 단축 하중을 측정하기 위한 링크 타입의 로드셀을 설계 제작하였다. 또한 최소 개수의 센서를 사용하면서 동시에 동상잡음의 효과적인 제거와 압축응력에 의한 편심 발생 유무 확인하기 위해 총 3개의 광섬유 브래그 격자 센서를 적절한 위치와 방향을 고려해 부착하였다. 또한 LabView를 이용해 자체 신호처리 프로그램을 제작하여 사용자의 편의성을 높였다. 최종적으로, 로드

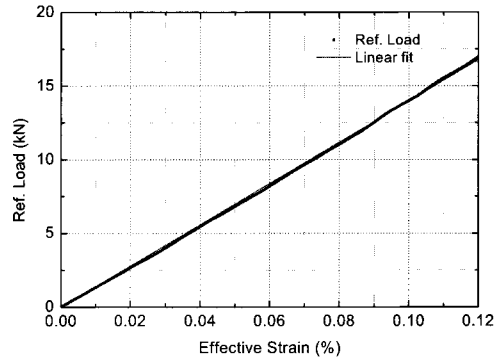


Fig. 12 Calibration of relation between reference load and effective strain

셀의 설계 제작 완료후, 단순 인장 실험을 수행하였으며 이를 통해 로드셀의 민감도($13.99 \text{ N}/\mu\text{strain}$)와 선형성 그리고 해상도(0.070 kN)를 성공적으로 측정하였다. 향후, 본 논문에서 개발된 광섬유 단축 로드셀 연구를 바탕으로 해상도 및 민감도 향상 연구와 다축 로드셀 개발 연구를 확대 수행할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 이러한 광섬유 로드셀은 기존의 전자 로드셀이 접근하기 곤란한 설비 및 구조물의 구조 건전성 모니터링 연구에 적극 활용될 수 있을 것으로 예상되어 비파괴 검사법의 다양화에 일조할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] R. M. Measures and K. Liu, "Fiber optic sensors focus on smart systems," IEEE Circuits Devices Mag., Vol. 8, No. 4, pp. 37-46, (1992)
- [2] D. H. Kim and J. J. Lee, "Vibration-monitoring of a real bridge by using a Moiré-fringe-based fiber optic accelerometer," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 27, No. 6, pp. 556-562, (2007)
- [3] D. Kersey, M. A. Davis and H. J. Patricks et al., "Fiber grating sensors," Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 8, pp. 1442-1462, (1997)
- [4] D. H. Kim, B. Y. Koo, C. G. Kim and C. S. Hong, "Damage detection of composite

- structures using a stabilized extrinsic fabry-perot interferometric sensor system," *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, No. 3, pp. 593-598, (2004)
- [5] D. H. Kim, C. G. Kim and C. S. Hong, "Simultaneous monitoring of crack signals and strain of composites using a stabilized EFPI sensor system," *Key Engineering Materials*, Vol. 270-273, pp. 2146-2151, (2004)
- [6] 류치영, "The strain monitoring of smart composite structures using fiber Bragg grating sensors by multiplexing method," 박사학위논문, (2001)
- [7] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson and J. Albert, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 62, No. 10, pp. 1035-1037, (1993)
- [8] A. T. Othonos, S. Alavie, S. Melle, E. Karr, R. M. Measures, *Opt. Eng.*, Vol. 32, pp. 2841-2845, (1993)
- [9] E. Udd, *Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley and Sons, (1995)