

論文

광섬유센서의 프리스트레인 부가 고정방식

김기수*

Fixation Method of Prestressed Fiber Optic Sensor

Ki-Soo Kim*

ABSTRACT

FBG sensor peaks could be split due to polarization by shear strain, when the fiber optic sensors embedded or attached to the structure. For the fiber optic sensor packages, sensor grating has to be protected from shear strains. Also, pretension has to be applied to the sensor because compressive strain must be measured. Without pretension of sensor, the sensor does not show any change of signal until it is stretched. In order to measure compressive and tensile strains, two fixing point and prestressed sensor need. In the fixing point, just holding the optical fiber cause slip between core and cladding in the fiber. A Fixation method of prestressed FBG sensors fixed with partially stripped fibers was developed. The sensor package has the prestress controllable fixtures at the fixing points. Prestress to the sensor imposed by controlling the two fixed points with bolts and nuts make it easy to measure compressive strain as well as tensile strain.

The fiber optic sensor packages applied to the actual structure and the structural monitoring system using the package can be applied to safety through surveillance.

초 록

광섬유센서는 구조물에 매립 또는 부착시 전단응력에 의해 편광이 발생하여 피크가 2개로 갈라질 수 있기 때문에 센서는 보호되고 양 끝단을 고정하는 방법으로 패키징을 하여야 하나, 광섬유의 클래딩 부분을 부착하는 방식으로 고정하면, 변형발생시 광케이블을 구성하는 코어와 클래딩 사이에서 미끄러짐 현상이 발생하기 때문에 이를 방지하기위해 센서의 양 끝단에 고정구를 사용하고 광섬유를 부분탈피하여 부착하여 접점을 만들어 줌으로써 외력에 의해 발생하는 변형을 정확하게 측정이 가능하도록 하였다. 그리고 기존 광섬유격자센서가 자체적으로 압축변형의 측정이 곤란한 점을 개선하기위해 미리 긴장(Pre-Strain)상태를 유지하기 위하여 두 개의 접점사이를 볼트와 너트로 조절하여 프리스트레인 가변이 가능하도록 하여 인장/압축변형 측정을 가능하게 한 광섬유격자센서 패키지를 제작하였다.

이러한 광섬유격자센서패키지를 실제구조물에 적용하여 측정하였으며, 이를 통하여 안전을 감시하는 모니터링시스템에 적용할 수 있도록 하였다.

Key Words : 광섬유센서(fiber optic sensor), 센서 패키지(sensor packages), 프리스트레인(prestressed sensors), 부분탈피(partial stripping), 모니터링시스템(monoring system)

접수: 2012년 10월 23일, 수정: 2012년 12월 17일, 게재승인: 2012년 12월 17일

* 홍익대학교 재료공학부, Corresponding author(E-mail:kisoo@hongik.ac.kr)

1. 서론

계측기기는 기종에 따라 약간의 차이는 있으나 일반적으로 5년-10년 정도의 수명을 가지는 것으로 알려져 있으며, 센서 소자와 접속되는 접점은 대부분 금속이기 때문에 부식이 될 수 밖에는 없고, 부식이 진행되는 과정에서 단선이 되지 않더라도 계측치가 달라지게 되어 유한한 수명을 가질 수밖에는 없다.

이를 보완할 수 있는 방법은 최근 들어 설치되기 시작하는 광섬유센서를 사용하는 방법이다. 이를 사용하면 부식이 되지 않기 때문에 시공 중에 망실이 되지 않으면 20년 이상 데이터에 문제가 없이 사용할 수 있는 것으로 알려져 있어 광섬유센서를 모니터링용 센서로 사용하는 것이 타당하다.

광섬유 센서를 이용한 계측기기는 전자파 간섭을 받지 않아 노이즈가 대단히 적다. 낙뢰가 걱정되는 지역에서도 전기가 통하지 않는 광섬유 센서 시스템이 유리하고, 수분이 많은 지역에서도 부식의 우려가 적은 광섬유 센서가 적합하다. 광섬유의 직경이 1mm 보다 작으므로 측정범위와 정도에 따라 광범위하게 센서가 사용될 수 있고 구조물 거동에 영향을 거의 미치지 않는다. 광섬유 센서는 이러한 여러 장점 때문에 미국 등 선진국의 경우 다양한 연구가 진행되어 오고 있으며, 교량, 터널, 사면 등에 대한 적용이 이루어지고 있다.^{1)~4)}

본 논문에서는 광섬유센서를 구조물에 매립 또는 부착하여 사용할 경우, 전단응력에 의해 편광이 발생하여 피크가 2개로 갈라질 수 있음을 보여주었고, 이를 방지하지 위하여 센서가 보호되고 양 끝단을 고정하는 방법으로 패키징을 하여야 한다는 것을 보여 주었다. 그리고 광섬유의 클래딩 부분을 부착하는 방식으로 고정하면, 변형발생시 광케이블을 구성하는 코어와 클래딩 사이에서 미끄러짐 현상이 발생하는데, 본 논문에서는 이를 규명하였으며, 이런 미끄러짐 현상을 방지하기 위해 센서의 양 끝단에 고정구를 사용하고 광섬유를 부분탈피하여 부착하여 접점을 만들어 줌으로써 외력에 의해 발생하는 변형을 정확하게 측정이 가능하도록 함과 기존 광섬유격자센서가 자체적으로 압축변형의 측정이 곤란한 점을 개선하기 위해 미리 긴장(Pre-Strain)상태를 유지하기 위하여 두 개의 접점사이를 볼트와 너트로 조절하여 프리스트레인 가변이 가능하도록 하여 인장/압축변형 측정을 가능하게 한 광섬유격자센서 패키지를 제작하였다.

이러한 광섬유 변위센서를 실재구조물에 적용하여 변위를 측정하였으며, 이를 통하여 안전을 감시하는 모니터링시스템에 적용할 수 있도록 하였다.

2. 기본 이론

광섬유센서에는 여러 가지 종류가 있는데, 가장 많이 사용되는 광섬유 브래그 격자 센서를 살펴보면, Ge가 첨가된 광섬유 코어(Core)에 자외선 영역의 레이저를 주기적으로 주사

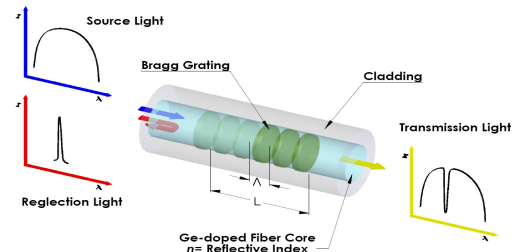


Fig. 1 Principle of light propagation in FBG.

함으로써 굴절률 변화를 유도하여 격자(Grating)를 생성하며, 이 격자의 간격에 의해 결정되는 특정 파장의 빛을 반사시키는 광소자이다. Fig. 1은 FBG의 구조를 나타낸다.

그림에서 같이 광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, 아래에 주어진 식(1)과 같은 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유 격자(Grating)에서 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다.

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

위의 식 (1)에서 n 은 광섬유 코어의 유효 굴절률(Effective Refractive Index)이며, Λ 는 격자(Grating)와 격자(Grating) 사이의 간격(Grating Period)이다.

격자(Grating)에서 반사되는 브래그(Bragg) 파장은 위의 식 (1)과 같이 유효 굴절률과 격자(Grating)간격의 함수이며, 변형률(Strain) 변화에 대한 브래그(Bragg) 중심 파장의 변화는 아래의 식 (2)와 같으며,

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)e \quad (2)$$

위의 식 (2)에서 P_e 는 광탄성 상수(Photo-elastic Constant)이며, 주로 사용되는 게르마늄 실리카 유리(Germano-silicate Glass)의 경우 대략 0.22의 값을 가지며, e 는 광섬유격자(Grating)에 가해진 변형률(Strain)이다.

3. 매립 또는 부착시 광섬유 거동

만일 광섬유센서가 코팅이나, 부착 또는 매립에 의하여 다른 물질에 둘러싸이게 된다면 센서에 부가되는 것은 단순히 스칼라 양의 크기를 갖는 스트레인인 아니고, tensor형태로 이루어진 값을 갖게 된다. 다음 그림은 복합재료 안에 광섬유센서가 매립되어 있는 형상을 보여주고 있다.⁵⁾

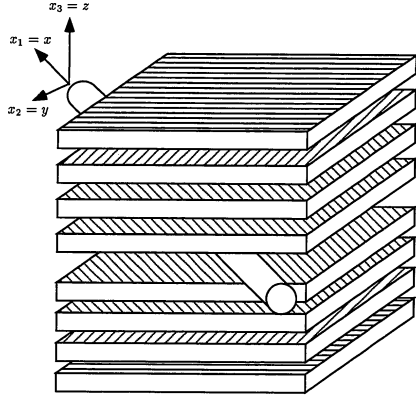


Fig. 2 FBG sensor embedded in composite structure.

이에 따라 발생하는 스트레인 $S = \begin{bmatrix} e_1 & e_6 & e_5 \\ e_6 & e_2 & e_4 \\ e_5 & e_4 & e_3 \end{bmatrix}$ 로 표시할 수

있으며, e_i^∞ 를 모재의 스트레인이라고 하고, 센서스트레인을 e_i^s 라고 한다면, 센서와 모재가 탄성체임을 가정하여, 센서스트레인을 모재의 스트레인으로 표시하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} e_1^s &= e_1^\infty \\ e_h^s &= \frac{(C - C^s)e_1^\infty + \Delta T \left\{ \frac{C^s}{\nu^s}(\nu^s + 1)\alpha^s - \frac{C}{\nu}(\nu + 1)\alpha \right\}}{2G + \frac{C^s}{\nu^s}} + \frac{2C(1 - \nu)}{\nu \left(2G + \frac{C^s}{\nu^s} \right)} e_h^\infty \\ e_d^s &= \frac{4G(1 - \nu)}{G + (3 - 4\nu)G^s} e_d^\infty \\ e_4^s &= \frac{4G(1 - \nu)}{G + (3 - 4\nu)G^s} e_4^\infty \\ e_5^s &= \frac{2}{1 + \frac{G^s}{G}} e_5^\infty \\ e_6^s &= \frac{2}{1 + \frac{G^s}{G}} e_6^\infty \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 G 는 shear modulus, ν 는 Poisson's ratio, and C 는 Lamé's constant이고 superscript s 는 광섬유센서의 물성을 나타내고, superscript ∞ 는 모재의 물성을 나타내는 표시이며, h 는 광섬유의 수직인 단면방향의 정수압물성인 hydrostatic 특성을 의미하며, d 는 전단특성을 나타낸다.

식 (1)에서의 굴절률은 스트레인의 함수가 되어 스트레인에 따라 편광특성이 발생하여 빠른 축과 느린축이 존재하게 되어, 두 방향이 서로 다른 굴절률을 가지게 된다. 초기 굴절률로부터 스트레인 부가시 굴절률 변화는

$$\begin{aligned} \Delta^s n_p^{eff} &= -\frac{n_0^3}{2} \left[p_{12}e_1^s + (p_{22} + p_{23})e_h^s + \frac{p_{22} - p_{23}}{2}\gamma_{\max}^s \right] \\ \Delta^s n_q^{eff} &= -\frac{n_0^3}{2} \left[p_{12}e_1^s + (p_{22} + p_{23})e_h^s - \frac{p_{22} - p_{23}}{2}\gamma_{\max}^s \right] \end{aligned} \quad (4)$$

로 표현되고. 여기에서 n_0 은 초기 굴절률이고, p_{ij} 는 기계광학 계수, γ_{\max}^s 는 shear strain이다.

이를 평균굴절률 변화 $\Delta^s n_{avg}$ 와 굴절률 차이변화 $\Delta^s n_{dif}$ 로 나타내면 아래식과 같이 간단해 진다.

$$\begin{aligned} \Delta^s n_{avg} &= -\frac{n_0^3}{2} [p_{12}e_1^s + (p_{11} + p_{12})e_h^s] \\ \Delta^s n_{dif} &= -n_0^3 \frac{p_{11} - p_{12}}{4} \gamma_{\max}^s \end{aligned} \quad (5)$$

이를 식 (2)와 같은 형태의 파장변화로 다시계산해 주면

$$\begin{aligned} \frac{\Delta^s \lambda_{avg}}{\lambda_{B_0}} &= K_1 e_1^s + K_h e_h^s \\ \frac{\Delta^s \lambda_{dif}}{\lambda_{B_0}} &= K_s \gamma_{\max}^s \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서 constants K_i 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_1 &= 1 - \frac{n_0^2}{2} p_{12} \\ K_h &= -\frac{n_0^2}{2} (p_{11} + p_{12}) \\ K_s &= -\frac{n_0^2}{4} (p_{11} - p_{12}) \end{aligned} \quad (7)$$

그리고 식 (6)의 e_i^s 를 다시 모재의 스트레인인 e_i^∞ 로 바꾸어 준다면,

$$\begin{aligned} \frac{\Delta^s \lambda_{avg}}{\lambda_{B_0}} &= K_1' e_1^\infty + K_h' e_h^\infty \\ \frac{\Delta^s \lambda_{dif}}{\lambda_{B_0}} &= K_s' \gamma_{\max}^\infty \end{aligned} \quad (8)$$

이고, 여기서 K_i' 는

$$K_1' = K_1 + K_h \left(\frac{C\nu_{yx}}{\nu} - \frac{C^s\nu_{yx}^s}{\nu^s} \right) \left(2G + \frac{C^s}{\nu^s} \right)$$

$$K'_h = K_h \frac{2C(1-\nu)}{\nu \left(2G + \frac{C^s}{\nu^s} \right)}$$

$$K'_s = K_s \frac{4G(1-\nu)}{G + (3-4\nu)G^s} \quad (9)$$

이며, 여기서 G 는 shear modulus, ν 는 Poisson's ratio, and C 는 Lamé's constant이고 superscript s 는 광섬유센서의 물성을 나타내고, superscript가 붙지 않은 것은 모재의 물성을 나타낸다.

따라서 e_1^∞ 과 e_h^∞ 는 브래그파장의 일정한 변화를 일으키지만, γ_{\max}^∞ 는 브래그 파장이 분리하여 두 개의 파장으로 나타나는데 기여하게 되고, 그 정도는 γ_{\max}^∞ 의 크기에 비례하게 된다는 것을 알 수가 있다.

다음 Fig. 3은 한국과학기술원 실험실에서 복합재료 제작시 매트릭스로 열경화성 수지를 사용하여, 고온 가압 경화 전후에 모재에 매립된 센서의 브래그파장을 측정된 결과이다.⁶⁾ 여기에서 보이고 있는 센서의 평균 중심파장변화 $\Delta^* \lambda_{avg}$ 는 -2.76nm이고 센서의 중심파장차이 $\Delta^* \lambda_{dif}$ 는 0.38nm를 보여주고 있으며, 이는 상수값을 정확히는 알 수 없으나, 상기 수식들이 잘 맞고 있음을 입증하며, 정확한 상수 값들을 찾아서 넣을 수 있으면 광섬유방향의 수직인 면에 발생된 최대 전단변형률 γ_{\max}^∞ 값을 계산할 수 있다.

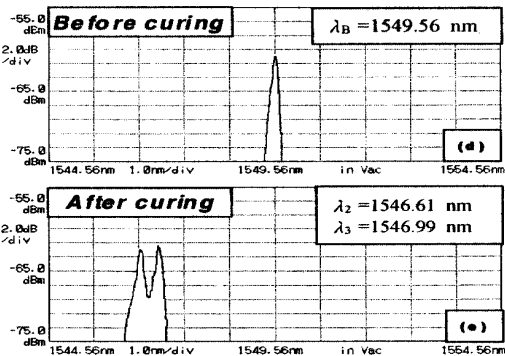


Fig. 3 FBG peak changes after composite curing.

4. 광섬유센서 고정방법 및 패키징 방법

4.1 부분탈피 후 광섬유센서의 고정방법

광섬유는 아래의 Fig. 4와 같이 일반적으로 8-10 μ m의 코어 부분과 굴절률이 다른 125 μ m 정도의 클래딩으로 이루어진 유리섬유이다. 광섬유격자센서는 이런 광섬유에 엑시머레이저나 알곤레이저로 광섬유의 코어부분에 격자를 생성하여 센서로

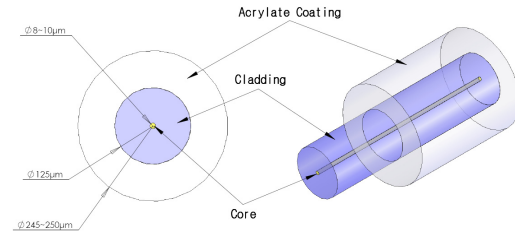


Fig. 4 Core and cladding of optical fiber.

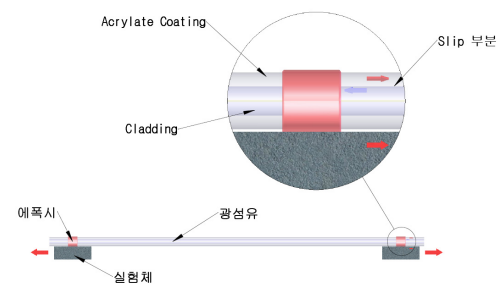


Fig. 5 Ordinary fixing method of fiber sensor.

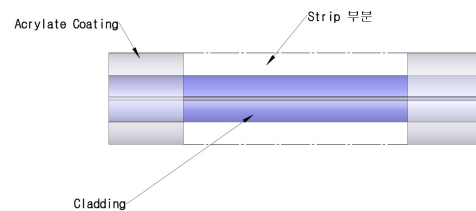


Fig. 6 Optical fiber stripped jacket.

사용한다. 이 굴절률 변화가 이루어져서 코어에 새겨진 격자가 센싱 소자로서 사용된다. 또한 유리재질로 되어 있는 광섬유는 자체적 파손의 위험 때문에 245-250 μ m 정도의 피복재킷으로 코팅되어 있는데, 대부분이 아크릴레이트 코팅(Acrylate Coating)으로 되어있다.

이러한 폴리머로 되어있는 피복재킷은 광섬유를 보호하는 장점이 있다. 그러나 광섬유를 부분 탈피하지 않고 Fig. 5와 같이 피복재킷 표면과 실험체에 직접 부착하게 되면 재킷(또는 코팅)과 클래딩사이의 미끄러짐(slip)현상이 발생하여 모재가 인장이 되더라도 광섬유는 늘어나지 않고, 장기간에 걸친 변형에 대한 거동을 정확하게 읽을 수가 없어서 부정확한 측정이 될 수 밖에는 없다.

따라서 인장력, 압축거동 및 장기적인 변형의 정확한 측정을 위해서는 Fig. 6과 같이 클래딩을 보호하고 있는 아크릴레이트 코팅이 되어 있는 피복재킷을 부분 탈피한 후, 측정하고자 하는 부분에 부착될 수 있도록 패키지를 만들어야 한다.

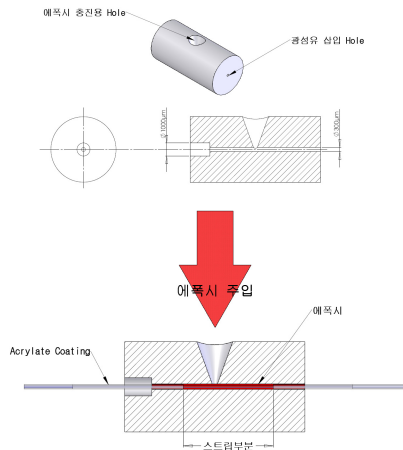


Fig. 7 Fiber fixture and fixing method.

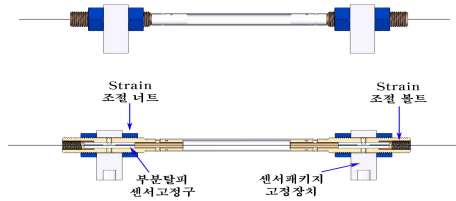


Fig. 8 Optical fiber sensor packages with stripped fiber fixture.

탈피(Strip)를 하게 되면 미끄러짐 현상은 없앨 수 있으나, 탈피하지 않은 광섬유에 비하여 인장 강도가 떨어지기 때문에 변형이 발생하게 되면 쉽게 끊어질 수 있으며, 광섬유격자센서를 다양한 목적으로 사용하기 위한 패키지(Package) 제작할 때 다루기가 매우 어려워진다. 이를 보완하기 위해 다음의 Fig. 7과 같은 부분탈피된 광섬유를 덮어서 보호할 수 있는 고정자(Fixture)를 사용하였다.⁷⁾ 고정자의 모양이나 크기는 패키지의 형태 및 부착방법이나 실험체의 표면모양 및 용도에 따라 여러 가지로 제작할 수 있으며, 광섬유를 보호하는 역할과 고정하는 역할을 동시에 가진다. 고정자를 사용하는 가장 큰 장점은 고정자에 광섬유격자센서를 고정 할 때 광섬유의 탈피된 표면에 에폭시로 직접 부착이 되어 광섬유에서 주로 슬립이 일어나는 재킷과 광섬유사이 부분이 존재하지 않아, 미끄러짐 현상을 방지할 수 있다. 아래 Fig. 7의 고정자와 유사한 용도의 보조장치 없이 광섬유의 부착할 부분을 탈피(Strip)하여 접착제로 부착할 경우, 탈피(Strip) 한 부분만 급격히 강도가 떨어져 끊어질 위험성이 매우 높아지지만, 이와 같은 고정자를 사용하면 탈피한 부분을 보호하는 역할도 같이 할 수가 있고, 고정자에 에폭시 충전용 구멍(Hole)을 뚫으면, 에폭시 주입을 용이하게 하여 탈피된 부분

을 보강하여 광섬유의 단락을 방지할 수 있으며, 이 경우 사용되는 에폭시는 경우에 따라 다르겠지만, 점도가 적절하게 맞추어져서 모세관현상에 의해 스며들어 광섬유 삽입 Hole로 스며나온 것이 보일 정도이지만 표면장력에 의해 흘러나오지는 않을 정도가 되도록 맞추어져야 한다.

4.2 광섬유 센서의 프리스트레인 가변형 패키징 방법

광섬유의 피복의 재킷을 부분탈피하여 고정자(Fixture)에 접착하게 되면, 접착부에서의 미끄러짐 현상은 더 이상 발생하지 않게 된다. 이와 같이 Fig. 8의 광섬유격자센서를 이용한 변형률계를 제작하였다. 고정자(Fixture)를 이용하여 광섬유를 고정한 후 고정자의 이동이 발생하지 않도록 볼트를 이용하여 고정한다.⁷⁾

광섬유격자센서 패키지 고정장치를 측정하고자 하는 위치에 정확하게 설치한 후 Strain 조절 너트를 이용하여 인장을 가하여 변형이 발생하도록 할 수 있으며, 일반적으로 압축으로 0.003(3,000 $\mu\epsilon$) 정도는 측정되어야 하므로, 압축력에 의한 변형률의 발생을 계측하려면 최소 3,000 $\mu\epsilon$ 이상의 프리스트레인이 가해져야 한다.

4.3 광섬유 센서 패키지의 검증시험

부분탈피하여 고정하고, 프리스트레인을 부가한 광섬유격자센서의 검증을 위해서 다음과 같은 실내 성능평가실험이 실시되었다.

아래의 Fig. 9의 시작품에 보이는 간극수압계를 제작하였다. 광섬유격자센서를 이용하여 압력을 감지하는 다이어프램을 설치하고 다이어프램이 움직이면 복판에 접착되어 있고, 광섬유를 부분탈피하여 고정하는 상기 방법에 의해 미리 긴장이 되어 있는 광섬유의 길이변화를 유도하여 압력을 측정할 수 있는 광섬유간극수압계 패키지를 제작하였으며, 공기압을 불어넣을 수 있는 공압기를 이용하여 광섬유센서 간극수압계 패키지에 압력을 가하여 시험하였다.



Fig. 9 Fiber optic pressure sensor package with stripped jacket.

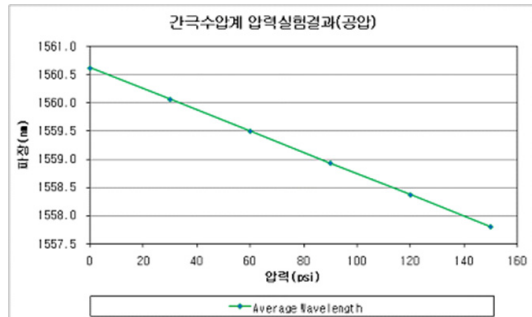


Fig. 10 Test results of the pressure sensor packages with strained fiber.

이 실내실험에서 광섬유센서의 파장변화는 아래 Fig. 10과 같이 압력에 따라 아주 직선적으로 변화하고 있음을 확인할 수 있었으며, 미리 긴장에 의해 광섬유에 부과한 6,000 μe 변형률이 점점 빠져서 압력을 잘 표현해 주고 있음을 보이고 있다.

상기 그림에서 보이는 바와 같이 부분탈피 후 고정하여 프리스트레인이 부과되어 있는 광섬유격자센서가 미끄러짐 현상이 나타나지 않고, 압력에 따라 잘 반응하고 있는 것이 확인된다.

5. 결론

본 연구에서는 광섬유격자센서가 모재와 일체화 되었을 때 전단변형에 의한 peak split 현상을 정량적으로 계산하여 검증하였다. 광섬유격자를 다양한 목적으로 사용하기 위한 패키지(Package) 제작할 때는 전단 변형을 회피하고 프리스트레인을 용이하게 부가하기 위해서 접착제나 에폭시가 직접 광섬유격자소자에 닿는 것을 피하고, 측정되는 소자의 좌우에 접점을 두어 부분탈피 후 별도의 고정자를 이용하여 고정하여 제작하여야 한다. 그리고 소자가 패키지의 벽에 닿지 않도록 제작하여 모재로부터 직접 응력을 받지 않도록 하여야 한다.

본 연구에서 제안하고 있는 고정방식을 활용하면, 전단응력에 의한 peak split 문제나 프리스트레인 부가의 어려움없이 그리고 재킷과 광섬유사이의 미끄러짐에 의한 오차없이 광섬유격자센서를 이용하여 압축과 인장을 동시에 측정할 수 있는 변형률계, 변위계, 압력계 등을 제작할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업의 지원 (과제번호: 20120006870)을 받아 수행되었으며, 2011학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) Meltz, G., Morey, W.W., and Glenn, W.H., "Formation of Bragg grating in optical fibers by a transverse holographic method," *Optics Letters*, Vol. 14, No. 15, 1989, pp. 823-825.
- 2) Morey, W.W., Meltz, G., and Glenn, W.H., "Fiber Optic Bragg Grating Sensors," *SPIE*, 1169, 1989, pp. 98-106.
- 3) Koo, K.P., and Kersey, A.D., "Bragg Grating-Based Laser Sensors Systems with Interferometric Interrogation and Wavelength Division Multiplexing," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, No. 7, 1995, pp. 1243-1248.
- 4) Kim, K.S., "System Integration Test of Containment Structure of Nuclear Power Plant Using Fiber Optic Sensor," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 16, No. 6, 2003, pp. 56-60.
- 5) Kim, K.S., Kollar, L., and Springer, G.S., "A Model of Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Temperature and Strain Sensors," *Journal of Composite Materials*, Vol. 27, No. 17, 1993, pp. 1618-1662.
- 6) Lee, J.R., Kim, C.G., and Hong, C.S., "Spectrum Characteristics and Stress Induced Birefringence of Fiber Bragg Grating Embedded into Composite Laminates," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 15, No. 3, 2002, pp. 30-38.
- 7) Kim, K.S., "Monitoring System For The Subway Structures Using Prestrained FBG Sensors Fixed With Partially Stripped Fibers," *Journal of COSEIK*, Vol. 21, No. 6, 2008, pp. 611-617.