

온도 보상형 Double FBG 센서의 제작과 기계적 변형률 측정시험

Fabrication of a Temperature-Compensating FBG Sensor for Measurement of Mechanical Strain

정달우*, 권일범**, 최낙삼***†

Dal-Woo Jung*, Il-Bum Kwon** and Nak-Sam Choi***†

초 록 본 연구에서 개발한 온도 보상형 double FBG 센서는 서로 다른 브래그 파장을 갖는 두개의 FBG 센서를 직렬로 연결하여 다양한 열적 조건하에서 구조물의 기계적 변형률만을 실시간으로 측정하기 위한 센서이다. 이 센서를 알루미늄 보에 접착하여 다양한 온도 조건에서 변형률 측정 실험을 수행하고, 결과값을 전기 저항식 변형률 게이지의 결과값과 비교하였다. 본 연구에서 제작한 온도보상형 double FBG 센서는 온도의 변화에 영향을 받지 않고 기계 변형률 측정을 잘 수행하였다.

주요용어: 온도 보상형 double FBG 센서, 기계적 변형률, 열 변형률, 전기 저항식 변형률 게이지

Abstract A temperature-compensating double fiber Bragg grating(FBG) sensor having two different FBGs in one fiber line was proposed for real time measurement of mechanical normal strain in structures. Measurement of mechanical strains of the aluminum beam surface by the double FBG sensor was performed under various thermal conditions, and the results were compared with those of electrical resistance strain gage. The FBG sensor fabricated in this study was able to measure accurately the mechanical strains without containing any thermal strain component.

Keywords: temperature-compensating double FBG sensor, mechanical strain, thermal strain, electrical resistance strain gage

1. 서 론

발전소, 다리, 고층건물과 같은 대형 구조물의 경우 시간이 지남에 따라 노후 및 파손이 발생하게 된다. 이로 인해 국소부분에 이상이 발생하면 시스템 전체가 작동되지 않고 막대한 경제적 손실과 수많은 인명피해를 가져올 수 있다. 구조물의 파손 상태 및 파손 진전에 따른 구조물의 강성, 강도 등의 변화를 적절히 평가할 수 있도록 파손특성에 대

한 연구가 활발히 진행 중이며, 손상검출 방법에는 X-Ray와 초음파를 이용한 C-Scan등이 있다. 그러나 이러한 비파괴 검사(Nondestructive evaluation)는 작업자의 기술이나 경험 또는 숙련도에 매우 의존적이어서 전문가 양성에 오랜 시간이 걸리며, 작업자의 손이 미치지 않는 부분이나, 구조물이 작동중일 때 또는 구조물 전체의 검사가 필요한 경우 검사가 용이하지 않다는 단점이 있다.

이에 따라 기존의 검사방법보다 효율적인 검사방

(접수일: 2005. 8. 9, 심사완료일: 2005. 9. 8) * 한양대학교 대학원 기계설계학과, ** 한국표준과학연구원, *** 한양대학교 기계정보경영공학부, † Corresponding author: Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Ansan 426-791 (E-mail: nschoi@hanyang.ac.kr)

법이 요구되어져 왔으며, 이를 위해 구조물의 변형 상태 및 파손여부를 감지하고 능동적으로 대처할 수 있는 기능을 구조물 자체에 부여하는 연구의 필요성이 대두되었다. 이런 구조물을 지능 구조물(intelligent structure)이라고 하는데 이를 구성하기 위해선 실시간으로 구조물의 변형을 감지하는 것과 구조물 전체의 감시가 가능해야 한다. 위의 조건을 만족하는 센서로는 ER(electro-rheological) 유체나 압전현상을 이용하는 압전 센서(Piezo-Electric sensor), 빛의 간섭(interferometer)이나 편광(polarization)을 이용하는 광섬유센서(optical fiber sensor) 등이 있다. 특히 광섬유를 이용하여 센서를 구성하는 경우 작동 온도범위가 매우 넓으며(-200~170℃) 광섬유의 직경이 작고 유연하여 설계자가 원하는 크기의 센서를 쉽게 구성할 수 있다. 또한 빛을 이용하므로 감도가 매우 뛰어나고, 실시간으로 손상을 검출할 수 있으며, 전자기파의 영향을 받지 않는다. 이와 같이 기존의 감지계에 비해 많은 장점을 가지고 있는 광섬유 센서는 많은 부분에서 기존의 감지계를 대체할 것으로 예상된다[1-4].

대표적인 광섬유 센서로는 A-EFPI(absolute extrinsic Fabry-Perot interferometric) 센서와 FBG(fiber Bragg grating) 센서 등이 있는데 FBG 센서가 A-EFPI 센서에 비해 구조가 단순하고, 제작공정이 간단하며 또한 제작비용이 적게 들어 대량생산이 가능하다는 장점을 가지고 있어서 현재 FBG 센서가 대세를 이루는 추세이다[5,6].

하지만 FBG 센서의 경우 온도와 변형에 모두 민감하다는 단점을 가지고 있다. 광섬유는 온도의 변화에 따라 팽창과 수축을 하게 되는데 이에 따라 광섬유에 새겨진 브래그 격자의 간격도 변하게 된다. 따라서 FBG 센서는 온도에 매우 민감하게 반응한다. FBG센서를 온도 센서로 사용할 때는 온도민감성이 장점이 되겠지만 온도가 일정하지 않은 환경에서 기계적 변형률만을 측정할 때에는 아주 큰 단점으로 작용하게 된다. 따라서 FBG센서를 기계적 변형률센서로 사용하기 위해서 온도의 효과를 보상해 줄 수 있도록 두개의 FBG 센서를 적절히 배치하는 방법들이 제안되어져왔다[7-9].

본 연구에서는 약간의 브래그 파장의 차이를 보이는 두 개의 FBG 센서를 용융접합(fusion splicing)하여 직렬로 연결함으로써 온도 보상형 double FBG 센서를 개발하였다. 이 센서를 알루미늄 시편의 표면에 접착하여 다양한 온도조건 및 시

간에 따라 변형률을 측정하였고, 이 측정값을 전기저항식 변형률 게이지의 측정값과 비교하여 기계적 변형률 센서로서의 성능을 검증하였다.

2. 센서의 원리

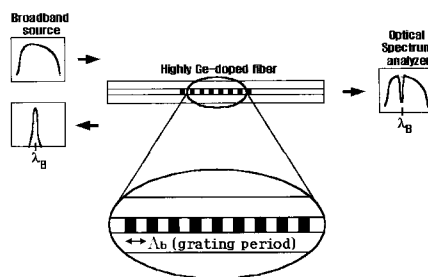


Fig. 1 Reflective principle of fiber Bragg grating

Fig. 1은 FBG 센서의 기본 작동원리를 보여준다[10]. FBG 센서에 광대역 광원을 입사시키면 브래그 파장(Bragg wavelength, λ_B)이라 불리는 특정 대역의 빛만 반사가 되고, 브래그 파장을 제외한 나머지 파장 대역의 빛은 FBG 센서를 통과하게 된다. 식 (1)은 브래그 파장을 결정하는 브래그 조건(Bragg condition)식을 나타낸다.

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

여기서 n_{eff} 는 광섬유 격자의 유효 굴절률(effective refractive index)이고, Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자 간격(Bragg period)이다. 식 (1)에서 볼 수 있듯이 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며, 광섬유 격자에 온도나 기계적 변형 등의 외부 물리량을 가할 경우 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다. 브래그 파장의 변화를 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 미지의 물리량(온도, 스트레인)을 식 (2)을 통하여 역으로 계산할 수 있으며, 이것이 광섬유 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다. 브래그 파장의 변화 $\Delta\lambda_B$ 는 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - p_e)\Delta\epsilon] \tag{2}$$

여기서 α 는 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)이고, ξ 는 열 광학 계수(thermo-optic coefficient), p_e 는 광탄성 상수(photo-elastic constant)이다. 이

값들은 실험에 의해 구할 수 있는 계수들 이므로 식 (2)는 식 (3)과 같이 간단하게 줄일 수 있다[11].

$$\Delta\lambda_B = K_T \Delta T + K_{\epsilon} \Delta\epsilon \quad (3)$$

여기서 K_T 는 열감도 계수(thermal sensitivity coefficient)이고, K_{ϵ} 는 변형률감도 계수(mechanical strain sensitivity coefficient)이다. 식 (3)에서 볼 수 있듯이 FBG 센서는 온도와 변형률의 영향을 모두 받는다. 따라서 온도가 일정하지 않은 환경에서 순수한 변형률을 측정하기 위해서는 온도의 변화에 따른 브래그 파장의 변화를 보정해줄 수 있는 또 다른 FBG 센서의 구성이 필요하다.

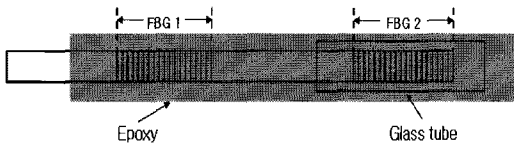


Fig. 2 Configuration of fiber Bragg grating

Fig. 2는 본 연구에서 제작한 온도 보상형 double FBG 센서의 형상을 나타낸다. Fig. 2와 같이 기계적 변형과 온도의 영향을 동시에 받는 FBG 1 센서와 유리관을 씌워 외부의 변형에 영향을 받지 않고 온도의 영향만 받는 FBG 2 센서를 용융접합하여 double FBG 센서를 구성하였다. FBG 2 센서에서 얻은 온도의 영향을 FBG 1 센서에서 얻은 데이터에 적용시키면 온도의 영향을 배제한 순수한 변형률 값을 구할 수 있다[12]. 그리고 이 double FBG 센서를 에폭시(epoxy)로 패키징(packaging)하여 온도 보상형 double FBG 센서를 완성하였다.

식 (3)을 이용하면 FBG 1 센서의 브래그 파장의 변화량 $\Delta\lambda_{1\epsilon}$ 은

$$\Delta\lambda_{1\epsilon} = K_{1T} \Delta T + K_{1\epsilon} \Delta\epsilon \quad (4)$$

이고, FBG 2 센서의 브래그 파장의 변화량 $\Delta\lambda_{2\epsilon}$ 은

$$\Delta\lambda_{2\epsilon} = K_{2T} \Delta T \quad (5)$$

이다.

여기서 K_{1T} 와 K_{2T} 는 각각 FBG 1과 FBG 2센서의 열감도 계수이고, $K_{1\epsilon}$ 은 FBG 1 센서의 변형률감도 계수이다. 식 (4)와 식 (5)를 연립하여 기계적 변형률 변화량의 향으로 정리하면 식 (6)과 같다.

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\lambda_1 - (K_{1T}/K_{2T}) \times \Delta\lambda_2}{K_{1\epsilon}} \quad (6)$$

여기서 K_{1T} , K_{2T} , $K_{1\epsilon}$ 의 값들은 모두 실험을 통해 구할 수 있다.

3. 실험방법

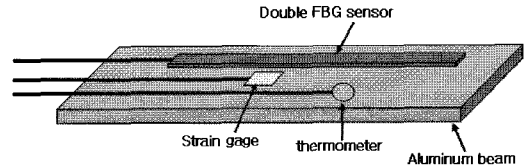


Fig. 3 Sensor arrangements on the aluminum beam

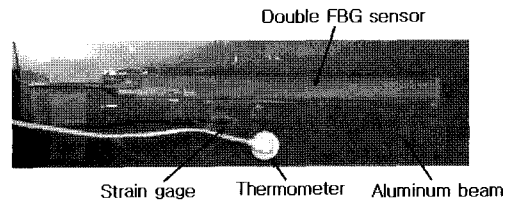


Fig. 4 A double FBG strain sensor and test sample fabricated for this study

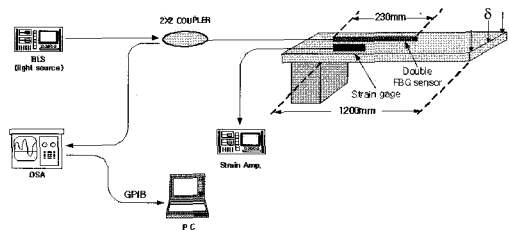


Fig. 5 Experimental setup of temperature-compensating double FBG sensor and strain gage

본 연구에서 사용된 시편은 일반 판재용 금속으로 널리 쓰이는 알루미늄 6061을 사용하였다. 이 시편의 표면에 Fig. 3과 같이 온도 보상형 double FBG 센서를 접착하고, 전기 저항식 변형률 게이지와 전자식 온도계를 각각 FBG 1과 FBG 2의 옆에 나란히 접착하였다. Fig. 4는 이와같이 실험제작한 샘플의 사진이다. 전기 저항식 변형률 게이지는 Kyowa사의 KFG-5-120-C1-11LIM2R을 사용하였고, 온도계는 분해능이 0.1°C인 1채널 접촉식 온도계를 사용하였다.

Fig. 5는 온도보상형 double FBG 센서와 변형률 게이지를 이용하여 기계적 수직 변형률을 측정하기 위한 실험장비의 구성을 나타낸다. 광원은 BLS 광대역 광원을 사용하였고, FBG 센서의 신호는 광파형 분석기(optical spectrum analyzer, OSA)를 통해 분석하였다. 이렇게 분석된 신호는 GPIB를 통하여 PC로 전송되어 실시간으로 변형률을 측정 할 수 있도록 하였다. 한편, 변형률 게이지 신호는 Kyowa 사의 EDX-1500A 앰프(amp) 이용하여 FBG 센서의 신호와 동시에 측정하였다.

식 (6)에서 $K_{1\epsilon}$ 값(0.00122 nm/ μ strain)은 이미 여러 논문과 실험들에 의해 알려져 있다[13,14]. 따라서 식 (6)에서 미지수인 온도계수 K_{1T} 와 K_{2T} 의 값을 구하기 위해 변형은 가하지 않고 온도만 변화시키는 온도실험을 수행하였다. 실험결과 시편의 온도가 20.4℃ 증가했을 때 FBG 1 센서의 브래그 파장 변화량 $\Delta\lambda_1$ 은 0.312nm이고, FBG 2 센서의 브래그 파장 변화량 $\Delta\lambda_2$ 은 0.148 nm 였다. 또한 하중을 전혀 가하지 않았으므로 굽힘 변형률의 변화량 $\Delta\epsilon$ 은 0이다. 따라서 이 값들을 식 (4)와 식 (5)에 대입하면 다음과 같이 K_{1T} 와 K_{2T} 의 값을 구할 수 있다.

$$K_{1T} = \frac{\Delta\lambda_1}{\Delta T} = \frac{0.3125}{20.4} = 0.0153 \quad (7)$$

$$K_{2T} = \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta T} = \frac{0.1482}{20.4} = 0.0073 \quad (8)$$

이로서 식 (6)의 미지수인 $K_{1\epsilon}$, K_{1T} , K_{2T} 의 값을 모두 구하였으므로 실험을 통해 $\Delta\lambda_1$ 와 $\Delta\lambda_2$ 을 측정한다면 우리가 원하는 기계적 변형률의 변화량 $\Delta\epsilon$ 를 구할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

온도 보상형 FBG 센서가 온도 보상을 제대로 수행하는지 알아보기 위해 기계적 변형은 가하지 않은 채 온도만 변화시키는 실험을 수행하였다. Fig. 6은 온도증가에 따른 온도 보상형 FBG 센서와 보상되지 않은 FBG 센서의 변형률 측정 결과를 나타낸다. 온도를 보상해주지 않은 기존의 FBG 센서의 변형률 측정값은 온도가 증가함에 따라 마치 기계적 변형이 가해진 것처럼 변형률이 증가함을 보였지만

온도를 보상해준 온도 보상형 double FBG 센서의 변형률 측정값은 온도의 변화에도 변동이 없이 일정한 값을 유지했다. 따라서 본 연구에서 제작한 온도 보상형 double FBG 센서는 온도 보상을 제대로 수행함을 알 수 있다.

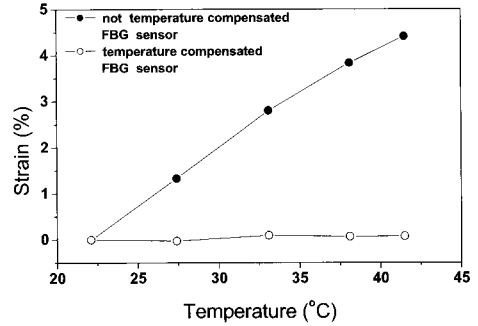


Fig. 6 Strain variations obtained by a temperature-compensating double FBG sensor and a conventional FBG sensor under the condition of thermal load change

다음으로 온도 보상형 FBG 센서가 다양한 온도 조건에서도 변형률 측정을 제대로 하는지 알아보기 위해 일정한 온도 하에서 변형만을 가한 실험을 수행하였다.

Fig. 7은 상이한 온도 조건하에서 온도 보상형 double FBG 센서로 측정된 변형률 측정값과 전기 저항식 변형률 게이지로 측정된 측정값을 비교하여 나타내었다. 두 센서로 측정된 변형률값 모두 굽힘 변형 δ 의 증가에 따라 선형적으로 증가함을 보인다. 상온(25℃)에서 변형률 측정 실험을 수행한 경우 온도 보상형 double FBG 센서로 측정된 변형률 측정값이 전기 저항식 변형률 게이지의 측정값에 비해 $\pm 0.2\%$ 정도의 변동을 보인 반면에, 43℃의 환경에서 변형률을 측정 했을 때 온도 보상형 double FBG 센서의 측정값이 전기 저항식 변형률 게이지의 측정값보다 -0.27 ~ -0.003% 정도 일관되게 낮게 측정됨을 보인다. 이는 온도가 올라갈수록 변형률 게이지의 게이지 인자(gage factor)가 감소하는 현상으로 인해 변형률 게이지의 측정값이 일관되게 높게 나오는 것으로 판단된다[15]. 또한 각각의 개별적인 데이터 점(data point)들을 보면, 온도 보상형 double FBG 센서의 데이터 점들이 전기 저항식 변형률 게이지의 데이터 점들에 비해 상하로 더 심한 변동을 보인다. 이는 광파형 분석기의 분해능

한계와 온도 보상형 double FBG 센서의 데이터 전송 과정이 전기 저항식 변형률 게이지의 데이터 전송 과정보다 더 복잡한 처리과정을 거치는데서 오는 오차의 누적 때문이라 판단된다.

다음은 온도 보상형 FBG 센서가 온도와 하중이 동시에 변하는 환경에서도 온도의 보상과 변형률

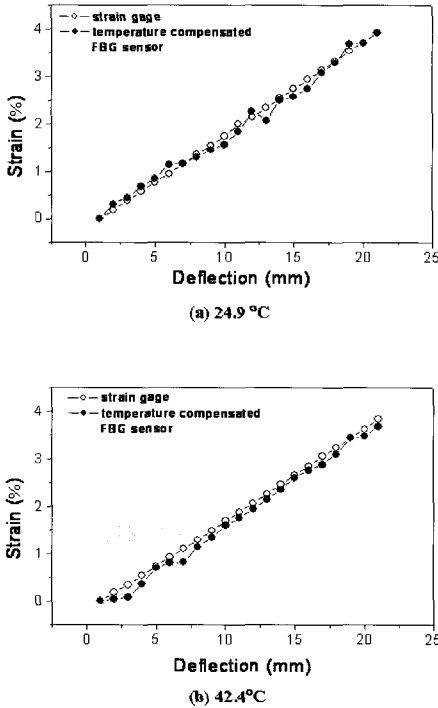


Fig. 7 Strain variations as a function of deflection measured from double FBG sensor and electrical resistance strain gage under different thermal conditions

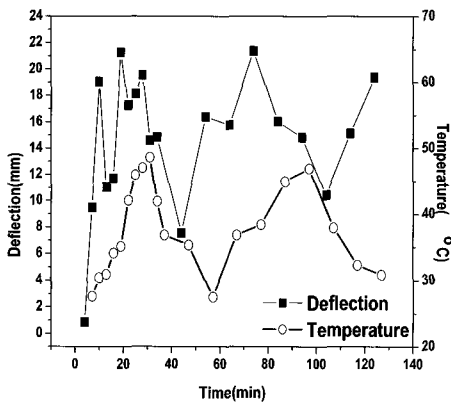


Fig. 8 Loading history of deflection and temperature

측정을 잘 하는지 알아보기 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다. 온도와 굽힘 변형은 Fig. 8과 같이 변화시켰다. 온도는 열선을 이용하여 가열하고 공냉방식을 이용하여 냉각하는 방식으로 25~43°C의 범위 내에서 변화시켰다. 변위는 굽힘 변위를 통하여 시편에 하중을 가하여 주었다. 그리고 온도와 굽힘 변형의 시간 간격은 처음 33분까지는 3분 간격으로 변화 시켜주었고, 이후부터는 10분 간격으로 변화시켰다. 그리고 온도와 변위의 측정은 거의 동시에 수행하였다.

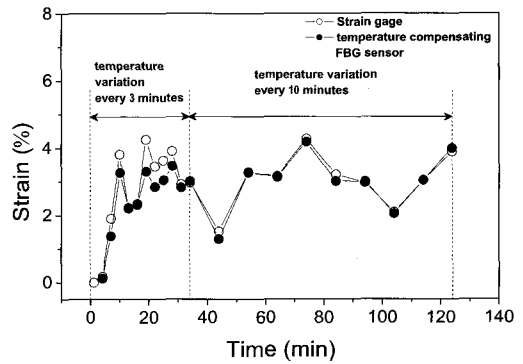


Fig. 9 Strains measured by double FBG sensor and electrical resistance strain gage at the same time as the temperature measurement point in Fig. 8

Fig. 9는 온도 보상형 double FBG 센서의 변형률 측정값과 전기 저항식 변형률 게이지의 변형률 측정값을 비교한 그래프이다. Fig. 9의 변형률 측정 간격과 온도와 변위의 변화는 Fig. 8을 따른다. 실험결과 3분 간격으로 온도를 변화시킨 0~33분까지의 구간에서는 온도 보상형 double FBG 센서의 변형률 측정값이 전기 저항식 변형률 게이지의 변형률 측정값을 잘 쫓아가지 못하지만, 온도의 변화를 10분 간격으로 늘린 초기 33분 이후의 구간에서는 변형률 게이지의 측정값과 대체적으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이런 현상은 온도가 3분 간격으로 빠르게 변하는 경우 온도의 변화를 측정하는 FBG 2 센서 부분에 열이 충분히 전달되지 않아 온도 보상을 제대로 하지 못해 나타나는 현상으로 생각된다. 따라서 온도 보상형 FBG 센서의 패키징을 얇게 만들거나, 패키징 재료 자체를 열 전달률이 더 우수한 재료로 바꾸어 준다면 온도 보상 속도가 더욱 향상될 것으로 사료된다.

6. 결 론

FBG 센서의 최대 단점인 온도변화에 따른 브래그 파장의 변화를 보정하기위해 온도 보상형 double FBG 센서를 제작하고 실시간 변형률 측정 시스템을 구성하였다. 온도 보상형 double FBG 센서를 알루미늄 보에 접착하여 온도와 굽힘 하중을 임의로 변화시키면서 이 센서가 온도의 변화를 제대로 보정하면서 스트레인을 감지하는지 알아보았고, 온도계와 스트레인 게이지의 측정값을 비교함으로써 double FBG 센서의 측정값이 정확한지 알아보았다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서 제작한 온도 보상형 FBG 센서는 25~43℃에서 10분 간격의 온도변화에는 온도보상을 잘 하였고 변형률 측정값 또한 스트레인 게이지의 측정값과 잘 일치하였다.
2. 본 연구에서 구성한 변형률 측정 시스템은 실시간 변형률 측정이 가능하였다. 따라서 본 시스템과 온도 보상형 센서를 조합한다면 일상적인 외부 온도변화에 노출되어 있는 구조물의 기계적 변형률만의 측정이 가능함을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 배문섭, 최덕희, 박정서, "광섬유를 이용한 구조물 계측기술 개발(1차년도)", 과학기술처 기관교유사업 보고서, KRISS-98-044-IR, pp. 1-5, (1996)
- [2] 박중완, "광섬유 센서를 이용한 복합적층판의 변형률 측정", 석사학위논문, 한국과학기술원, pp. 1-4, (1994)
- [3] 권일범, "광섬유 센서를 이용한 복합재 보의 변형률 측정 및 파손 검출", 박사학위논문, 한국과학기술원, pp. 18-19, (1997)
- [4] 박래영, "광섬유 TR-EFPI 센서를 이용한 복합재료의 내부 변형률 측정", 석사학위논문, 한양대학교, pp. 19-31, (2001)
- [5] R. O. Claus, J. C. Mckeeman, R. G. May and K. D. Bennet, "Optical Fiber Sensors and Signal Processing for Smart Materials and Structures Applications", Proc. of ARO Smart Materials, Structures and Mathematical Issues Workshop, pp. 29-38, (1988)
- [6] I. B. Kwon, C. G. Kim, and C. S. Hong, "A digital signal procesing algorithm for structural strain measurement by a 3×3 passive demodulated fiber optic interferometric sensor," Smart Materials and Structures, Vol. 8. No. 4, pp. 433-440, (1999)
- [7] D. Z. Anderson, V. Mizrahi, T. Erdogan, and A. E. White, "Production of in-fiber gratings using a diffractive optical element," Electron. Lett 29, pp. 566-568, (1993)
- [8] H. B. Liu, H. Y. Liu, G. D. Peng and P. L. Chu, "Strain and temperature sensor using a combination of polymer and silica fiber Bragg gratings," Optics Communication, 219, pp. 139-142, (2003)
- [9] A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, P. J. Lemaire, N. S. Bergano, and C. R. Davidson, "Long-period fiber-grating-based gain equalizers," Opt. Lett. 21, pp. 336-338, (1996)
- [10] 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. 62, pp. 1035-1037, (1993)
- [11] A. Othonos, K. Kalli, "Fiber Bragg Gratings : Fundamentals and Applications in Telecommunications and sensing," Artech House, INC., (1999)
- [12] 송민호, 이상배, 최상삼, 이병호, "Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 광섬유 브래그 격자 센서", 전자공학회논문집, 제2호 D편 제3권, pp. 205-213, (1997)
- [13] V. V. Spirin, M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov, and I. Marquez, "temperature-compensated strain measurement using differential double Bragg grating technique," Optics & Laser Technology 33, pp. 44-46, (2001)
- [14] 송민호, 김부근, 정재훈, 이병호, "마하젠더 간섭계와 EDFA를 이용한 온도와 스트레인을 동시에 측정하는 광섬유 브래그 격자 센서", 한국광학회지, 제12권 제5호, pp. 371-375, (2001)
- [15] J. W. Dally, W.F Riley and J. S. Sirkis, "Chapter 2: Electrical Resistance Strain Gages," Handbook on Experimental Mechanics, edited by A. S. Kobayashi, VCH, INC., pp. 39-76, (1993)