

철도 구조물 적용을 위한 FBG 센서의 기계적 강도에 관한 연구

Research on the Mechanical Strength of Fiber Bragg Grating Sensor Adapting to Railway Structure

윤혁진[†] · 김정석*

Hyuk-Jin Yoon · Jung-Seok Kim

Abstract In order to apply FBG(Fiber Bragg Grating) sensor as one of reliable sensors in the commercial railway structure, the reliability of FBG sensor in the mechanical strength viewpoint have to be confirmed and the maximum strain should surpass the fracture strain of the host structure to measure the measurands until the host structures fail. In this paper, several factors that influence the mechanical failure strength of fiber Bragg grating sensors were analyzed. A set-up for dynamic tensile testing of optical glass fibers with fiber Bragg gratings was made. To increase the FBG failure strength, techniques relying on the H₂ loading treatment and stripping methods were established and testified as a result of the tensile strength test of optical fibers.

Keywords : FBG sensor, mechanical strength, smart structure, optical fiber sensor

요 지 광섬유 센서 중 대표적인 FBG 센서를 철도 구조물에 실제 적용하기 위해서는, 센서 자체의 기계적 강도에 대한 내구성이 확보되어야 하고, 철도 구조물의 파손 시까지 FBG 센서가 측정치를 측정할 수 있도록 충분한 변형률 한도를 가져야만 한다. 본 논문에서는 FBG 센서의 기계적 강도에 영향을 미치는 변수들에 대한 연구를 수행하였다. 기계적 인장 강도 시험을 위한 시험 셋업을 구성하였고, 광섬유의 광민감성을 증진하기 위해 사용된 수소침투법과 코팅층을 제거하기 위한 피복 제거기법을 사용한 FBG 센서의 인장 강도 변화를 시험 및 통계 처리를 이용하여 측정하였고, 강도저하가 거의 없음을 보여 주었다.

주 요 어 : FBG 센서, 기계적 강도, 스마트 구조, 광섬유 센서

1. 서 론

철도는 승객이나 화물을 실을 수 있는 철도차량과 철도 차량이 달릴 수 있는 선로, 에너지를 공급하는 시설, 승객과 화물을 수송할 수 있는 철도역, 전체 철도를 체계적으로 연결하고 있는 운영관리 시스템의 복합 시스템으로 이루어져 있다. 이 모든 구성요소들의 유기적 연계로 인하여 철도의 핵심적인 요소인 정시 출발과 도착을 가능하게 해 줄 수 있다. 최근 고속열차의 도입으로 인하여 쾌적하고 신속한 여행이 가능하게 되었으나, 열차 속도 증가는 전체적인 시스템의 위험도를 증가시킨다.

철도 시스템의 점점 복잡해지는 유기적 구조는 철도를 구성하는 하나의 요소에서 발생하는 문제로 인해 전체 시스템의 장애를 가져올 수 있으므로, 철도 구조의 안전과 현 상황을 실시간으로 감시할 수 있는 치밀한 시스템의 개발이 절실히 요구되고 있다.

철도 구조물의 변형 상태 및 파손 여부를 기존의 주기적인 검사 방법과는 다르게 구조물의 운용 중에 실시간으로 감시하고 상황에 맞는 대응을 할 수 있도록 해주는 구조물을 스마트 구조물(smart structure)이라고 한다[1]. 이러한 스마트 구조물의 기술이 철도 구조에 적용된다면, 철도차량의 경량화, 철도시설의 최적 설계 및 파손이 발생하기 전에 사고를 미연에 방지할 수 있어 구조물의 유지 보수에 따른 비용 절감 효과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 스마트 구조물은 외부에서 가해지는 변화를 감지하는 감지부, 감지된 정보로부터 상황을 판단하고 데이터를

[†] 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실
E-mail : scipio@krri.re.kr
TEL : (031)460-5565 FAX : (031)460-5289

* 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 책임연구원

처리하는 두뇌부, 두뇌부의 명령에 의해서 능동적으로 대응하는 작동부로 구성된다. 특히 감지부로는 기존의 전기 센서가 사용되기도 하지만, 최근에는 전자기파의 영향을 받지 않고 직경이 매우 작고 유연하고 내구성이 뛰어나 구조물의 설계 때부터 삽입하여 설계가 가능한 광섬유 센서에 대한 연구가 많이 이루어지고 있는 추세이다. 의료 기기 분야에서는 내시경 등의 보조 매질로서 응용되고 있으며, 현미경용 프로브, 조명장치 등 환경분야 센서로서도 많이 적용되고 있다. 이미 정보 전달을 위한 통신망은 광섬유로 대체되어 널리 사용되고 있으므로, 기 구축되어 있는 광섬유망과 연계 시 인터넷을 활용하여 정보전달을 원활히 할 수 있다는 장점을 얻을 수도 있다. 광섬유 센서는 침입자 감시 센서, 온도 및 속도, 회전율 등을 측정할 수 있는 가속도 센서, 자이로스코프 등에 활발히 응용되고 있다[2]. 특히 광섬유를 이용하여 연구되고 있는 센서 시스템은 광섬유의 코어에 특정 파장을 반사하는 격자를 새긴 FBG(Fiber Bragg grating) 센서, 광섬유의 끝에 적당한 박막을 부착한 압력센서, 빛의 편광 변화를 이용한 전류센서, 브릴루앙 산란을 이용한 분포형 광섬유 센서 등이 있다. 이 중에서 FBG 센서는 광섬유 센서의 대표적인 센서로 항공기, 잠수함 등의 건전성을 모니터링하는 용도로 활발히 연구되고 있으며, 최근 들어서는 FBG 센서를 적용하기 용이하도록 측정 시스템이 상용화 되어 사회기반시설물 등의 건전성을 모니터링 하는데 확장되어 사용되고 있는 추세이다[3]. 철도분야에서는 영동선(동백산-도계) 솔안터널 영구계측관리, 대구지하철 현충로역 터널 내공변위 모니터링, KTX 천성산 통과구간 원효터널 종점 사면 붕괴 감지 등에 적용 되고 있으며 적용 범위가 점차 늘어가는 추세이다. 그러나 FBG 센서를 구조물에 적용하여 필요한 데이터를 얻고 적용 가능성을 보여주는 연구는 많이 이루어지고 있는 반면에, 장기간 센서의 생존성을 증가시킬 수 있는 내구성에 대한 연구는 많이 부족한 실정이다.

본 논문에서는 광섬유 센서 중 가장 널리 사용되고 있는 FBG 센서를 철도 구조물 등에 적용하기 위해서 가장 큰 이슈가 되고 있는 기계적 강도에 대해서 실험한 결과를 언급하였다. FBG 센서의 기계적 강도에 미치는 인자 중, 광 민감도를 높이기 위해서 실시하는 수소 함침법, 광섬유 피복 제거 방법이 강도에 미치는 영향에 대해서 연구를 수행하였고, FBG 센서를 만들기 전 광섬유의 강도를 거의 떨어뜨리지 않음을 시험적, 통계적으로 보여주었다.

2. 기계적 인장 강도 시험

2.1 동적 인장 시험을 위한 설비 구축

광섬유는 Fig. 1과 같이 코어(core), 클래딩(cladding), 1차 코팅 층인 버퍼(buffer), 외부 코팅 층인 피복(jacket) 부분으로 이루어져 있다. 코어와 클래딩은 실리카(silica)가 주성분이며 빛을 실질적으로 전달하는 주 구조 부분이다. 이러한 주 구조를 보호하기 위하여 폴리머나 아크릴레이트 등을 사용하여 클래딩 표면을 1차로 피복하게 된다.

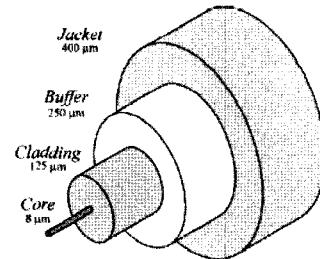
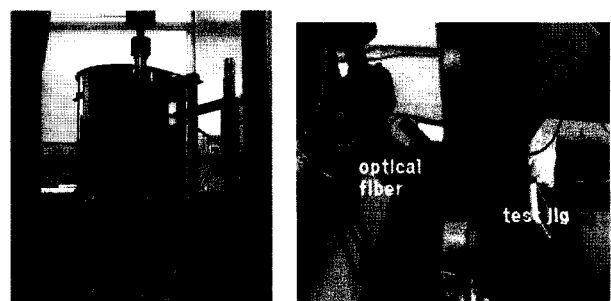


Fig. 1. Configuration of the optical fiber

광섬유 센서로 주로 사용되는 단일모드(single mode) 광섬유는 8 μ m 직경의 코어와 125 μ m 직경의 클래딩위에 아크릴레이트 코팅이 되어 250 μ m 직경을 갖는다. 상용화된 광섬유의 최소 직경은 버퍼 코팅층이 포함된 250 μ m이며, 사용 환경에 따라서 광섬유의 보호를 위해서 추가적인 외부 피복을 선택할 수 있다. 본 실험에 사용된 광섬유는 삼성 단일모드 광섬유이다.

250 μ m의 직경을 갖는 광섬유의 기계적 강도를 측정하기 위해서 일반적인 인장시험 지그를 이용하여 시험을 수행할 경우 버퍼 코팅층인 아크릴레이트가 클래딩에서 미끄러지는 현상이 발생하여, 인장시험 지그와 광섬유의 접촉면에서 광섬유가 끊어지거나 미끄러져서 빠지는 현상이 발생한다. 따라서 이러한 현상을 방지하기 위하여 Fig. 2와 같은 인장시험용 지그를 별도로 제작하였고, 광섬유가 두 지그에서 미끄러지는 것을 방지하기 위하여 두께 1mm의 우레



(a) Front view (b) Side view

Fig. 2. Apparatus for the tensile testing

탄 코팅을 하였다. 제작된 지그는 Fig. 2의 인스트롱(Model No. 4482)에 부착하여 실험을 수행하였고, 위쪽과 아래쪽 지그에 3번씩 광섬유를 와인딩하여 인장력이 고루 분포될 수 있도록 하였다.

광섬유의 동적 인장 시험을 위한 시험 구성은 IEC 60793-1-31 표준에 따라 구성되었다[4]. 게이지 길이는 150mm이고, 분당 5% 변형률을 가지는 일정한 속도로 동적 인장 실험을 수행하였다. 모든 실험은 23±1°C의 온도와 50%의 상대습도를 유지한 동일한 환경에서 수행되었다. 각각의 실험에서 사용된 시편의 수는 10~15개 이며, 측정된 로드셀 하중과 광섬유에 가해진 응력을 취득하였다.

2.2 기계적 인장 강도 평가

광섬유의 기계적 인장 강도에 영향을 미치는 주요 요소는 광섬유 길이를 따라 분포되어 있는 광섬유 표면과 내부의 균열들이다[5]. 이러한 균열은 광섬유를 초기에 제작할 때 발생한다기 보다는, FBG 센서를 제작하는 과정에서 작용하는 많은 변수들에 의해서 주로 발생한다. 광섬유의 파단 강도는 광섬유의 균열 분포에 따라서 변하기 때문에, 통계적인 결합분포 공식의 유도가 필요하다.

광섬유는 원통형 형상을 가지고 길이에 따라 균일한 물성 분포를 가진다고 가정하면, 광섬유의 길이방향으로 인장력이 가해졌을 때, 광섬유의 길이방향과 단면을 따라서 균일하게 2 자유도의 응력이 존재한다. 이것을 균열분포 $n(\sigma)$ 라고 정의하고, σ 와 $\sigma+d\sigma$ 사이의 응력에서 광섬유가 파단될 단위길이 당 균열의 수는 $n(\sigma)d\sigma$ 로 표현된다. 응력 σ 이하의 응력에서 단위길이 당 누적된 균열의 수는 식 (1)과 같이 표현된다[6].

$$N(\sigma) = \int_0^{\sigma} n(\sigma) d\sigma \quad (1)$$

단위길이 당 누적된 균열 분포 $N(\sigma)$ 는 식 (2)의 와이블 분포를 따른다고 알려져 있다[7].

$$N(\sigma) = \frac{1}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \quad (2)$$

여기서 σ 는 시험 중 광섬유에 가해진 응력이고, m 은 와이블 형태 상수, σ_0 는 와이블 스케일 변수, L_0 는 게이지 길이이다.

길이 L 인 광섬유가 σ 와 $\sigma+d\sigma$ 사이의 응력에서 파단될 확률은, 응력이 이 사이에 있을 때 이 광섬유가 균열을 가지고 있고, 응력 σ 에서는 파단되지 않는 경우로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$dF(\sigma, L) = F(\sigma+d\sigma, L) - F(\sigma, L) = (1 - F(\sigma)) \text{Ln}(\sigma) d\sigma \quad (3)$$

식 (3)을 적분하면, 누적된 파단 확률 F 를 파단 응력 분포의 함수로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F = 1 - \exp(-L \cdot N(\sigma)) \quad (4)$$

실험에 사용된 시편의 갯수를 M 이라면, 각각의 시편의 누적 파단 확률 F 는 실험적으로 다음과 같이 표현할 수 있다

$$F(\sigma_i) = \frac{i-0.5}{M}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (5)$$

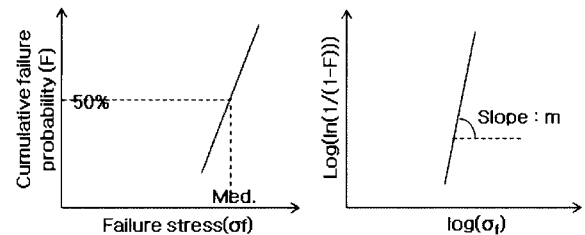
파단 응력은 크기 순으로 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M$ 이다. 즉 i 가 1일때가 가장 작은 파단응력 σ_1 이고, i 가 M 일 때가 가장 큰 파단응력 σ_M 을 나타낸다.

와이블 차트에서 누적 파단 확률 F 는 파단응력 σ_j 와 같이 표시하며, Fig. 3(a)에 나타내었다.

식 (2)와 식 (3)으로부터 다음 식 (6)을 유도할 수 있다.

$$\log\left(\ln \frac{1}{1-F(\sigma)}\right) = m \log(\sigma) - m \log(\sigma_0) + \log\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (6)$$

식 (6)은 Fig. 3 (b)처럼 와이블 선도의 로그-로그 축으로 표현할 수 있으며, 실험 결과의 기울기 추정으로부터 m 을 결정할 수 있으며, m 은 와이블형태상수로서 파단응력들의 분산을 나타낸다.



(a) Indication of breaking stress (b) Estimation of m value

Fig. 3. Illustration of Weibull distribution

와이블 분포를 특징지을 수 있는 두 가지 변수는 m 과 센서가 파단될 확률 50%에 해당하는 파단 응력들의 중간값 σ_{med} 이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수소 처리법에 의한 영향

광섬유 브래그 격자(FBG) 센서는 UV 레이저를 위상 마

스크(phase mask)를 통해서 광섬유에 조사하여 생성한다. 이 때 브래그 격자가 광섬유에 원활히 새겨지도록 하기 위해서는, 광섬유가 UV 레이저에 민감하게 반응하도록 광섬유의 광민감성을 사전에 증가시켜야만 한다. 광섬유의 광민감성을 증가시키기 위해 일반적으로 사용되는 방법은 광섬유를 고온 고압의 수소에 함침시키는 방법이다[8]. 수소 함침 법에 의해서 증가된 광민감성은 영구적인 것이 아니며, 광섬유에 함침된 수소가 빠져나가면서 광민감성은 감소되게 된다. 따라서 수소가 함침된 광섬유는 수소 탱크에서 꺼낸 이후 즉시 브래그 격자를 제작하게 된다. 본 실험에서 사용된 수소탱크는 Fig. 4와 같으며, 수소 처리시 압력은 130bar, 온도는 80°C 였다. 광민감성을 증가시키기 위해서 1주일간 아래의 수소탱크에서 충분히 수소에 함침되도록 하였다. 수소처리시 광섬유는 습도와 외부 환경이 클래딩에 영향을 미치지 않도록 버퍼층이 제거되지 않은 상태이다



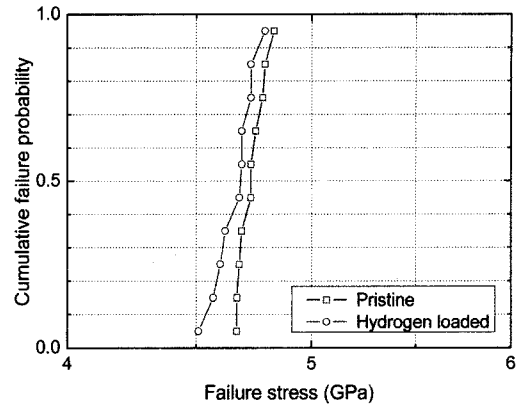
Fig. 4. Hydrogen loading equipment

수소처리된 광섬유의 강도 저하를 알아보기 위해서 10개의 샘플을 채취하여 Fig. 2의 시험지그를 이용하여 동적 인장시험을 수행하였다. 인장시험결과를 Fig. 5와 Table 1에 각각 나타내었다.

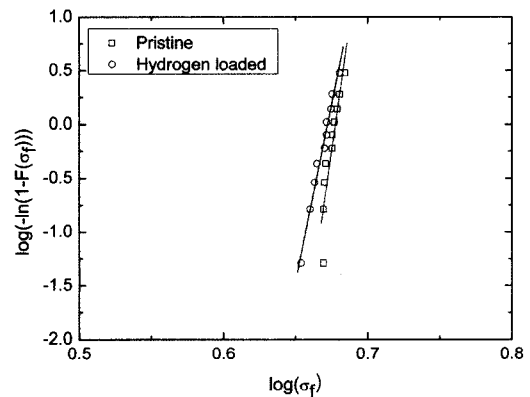
Table 1. Failure strength of pristine and Hydrogen loaded fibers

Fiber	M	Failure strength (GPa)			m
		Max.	Med.	Min.	
Pristine	10	4.83	4.74	4.67	94
H ₂ loaded	10	4.79	4.67	4.51	66

실험에 사용된 샘플의 수는 각 10개씩 이었고, 파단 응력은 수소 처리전 광섬유의 파단응력인 4.74GPa에서 4.67GPa로 소폭 감소하였고, m은 94에서 66로 저하되었다. 그러나 이 정도의 수소함침으로 광섬유의 강도 저하가 그리 크지는 않다고 판단된다.



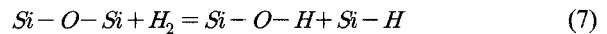
(a) Mechanical strength of pristine and H₂ loaded fiber



(b) Weibull distribution in log-log plot

Fig. 5. Weibull plots of pristine and Hydrogen loaded fiber

수소함침기간동안 수소와 실리카로 구성된 광섬유 사이의 상호작용이 일어나는데, 이러한 상호작용중 하나가 광섬유의 OH의 형성이다[9].



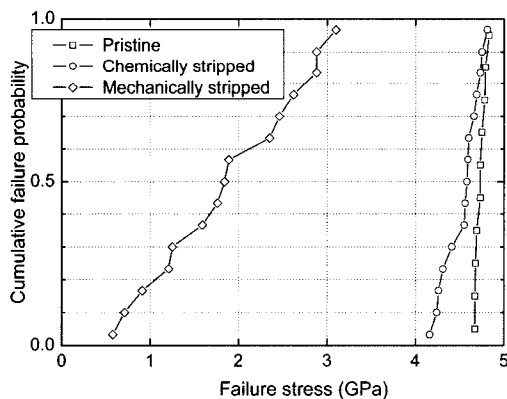
높은 온도에서 상당한 양의 OH가 형성되는 동안, 실리카 결합 구조는 광섬유의 피로를 증가시키게 되지만, 짧은 기간동안의 수소 함침에 의한 효과는 무시할만 한다. 따라서 광민감성을 증가시키기 위해서 충분한 시간(1주일)동안의 수소함침은 광섬유의 기계적 강도에 영향을 거의 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 광섬유 피복 제거법에 의한 영향

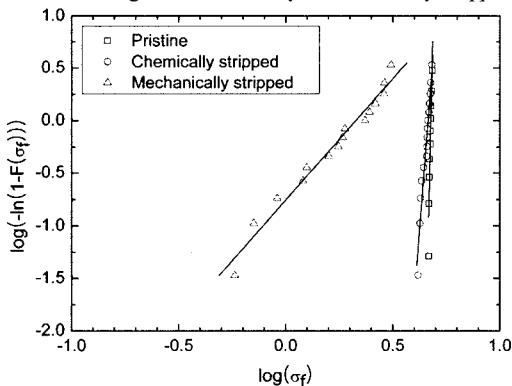
FBG 센서의 기계적 강도에 영향을 미치는 두 번째 요소는 광섬유 버퍼층 제거방법이다. 광섬유에 브래그 격자를 생성하기 위해서는, 브래그 격자가 생성될 부분의 1차 피복인 버퍼층을 제거하고 UV 레이저의 조사를 통해서 가능하다. 이 때 광섬유의 표면은 외부 환경이나 피복 제거 과정에 의해서 손상을 입을 수 있다[10].

따라서 피복 제거법도 광섬유 강도에 영향을 미치는 하나의 변수이며, FBG 센서를 제작하는 과정에 개입되는 다른 변수들의 영향을 분리해내기 위해서 이 실험이 먼저 수행되었다. 피복 제거방법으로는 기계적 제거 방법과 화학적 제거 방법의 두 종류가 사용되었다. 기계적 제거방법으로는 상용화된 피복 제거기를 이용하여 아크릴레이트(arclylate) 코팅을 제거하였고, 피복이 제거된 샘플은 즉시 인장시험이 실시되었다. 화학적 제거 방법으로는 약 $35\pm 2\text{mm}$ 길이의 광섬유를 $190\pm 10^\circ\text{C}$, 95wt.% 농도의 황산(H_2SO_4) 용액에 수초간 침침시켜, 화학적으로 아크릴레이트 코팅이 모두 제거되도록 하였다[11]. 모든 광섬유 샘플은 같은 환경 하에서 피복이 제거되었으며 광섬유끼리 서로 부딪치거나 황산 용액이 담긴 용기의 표면에 닿지 않도록 주의하여 수행되었다. 황산 용액에서 피복이 제거된 광섬유는 광섬유 표면의 잔류 황산을 제거하기 위하여 수 초간 증류수 용액에서 침침된 후, 광섬유 표면에서 모든 잔류물을 제거하기 위하여 아세톤 용액에 마지막으로 침침되었다. 그 후 기계적 인장 시험전과 시험 중간에 피복이 제거된 부분은 외부와 접촉하지 않도록 주의하여 시험이 수행되었다.

Fig. 6과 Table 2는 광섬유의 기계적 강도에 미치는 두 종류의 광섬유 피복 제거법의 영향을 나타낸다.



(a) Mechanical strength of mechanically and chemically stripped fibers



(b) Weibull distribution in log-log plot

Fig. 6. Weibull plots of mechanically and chemically stripped fiber

Table 2. Failure strength of mechanically and chemically stripped fibers

Fiber	M	Failure strength (GPa)			m
		Max.	Med.	Min.	
Pristine	10	4.83	4.74	4.67	94
Chemically stripped	15	4.81	4.56	4.16	26
Mechanically stripped	15	3.1	1.81	0.58	2

위 와이블 분포는 동적 인장시험의 결과이며, 기계적으로 피복이 제거된 광섬유의 파단 응력은 1.81GPa로 피복 제거 전 광섬유의 파단 응력 4.74GPa와 화학적으로 피복이 제거된 광섬유의 파단응력 4.56GPa에 비해서 크게 감소하였다. 그리고 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 기계적으로 피복이 제거된 광섬유의 Weibull 분포는 피복 제거 전 광섬유의 분포와 비교해서 상당히 넓어졌는데, m 이 피복 제거 전 광섬유의 경우에는 165이지만, 기계적으로 피복이 제거된 광섬유의 경우는 2로 줄어든 것을 볼 수 있었다. 화학적으로 피복이 제거된 시편에 관한한 파단 응력은 피복 제거 전 광섬유의 경우와 거의 같았지만, m 은 초기 값에 비해서 크게 줄어들었다. Table 2에 실험으로부터 얻어진 중간 파단응력과 m 을 요약하였다.

4. 결론

본 연구에서는 FBG 센서의 강도에 영향을 미치는 요소 중 수소흡침법과 피복제거 기법에 의한 영향을 살펴보았으며, 이 영향을 최소화 할 수 있는 방법을 실험적으로 보여 주었다. 광섬유의 광민감성을 향상시키기 위한 수소처리 기법은 실험에 사용된 조건하에서 강도 저하를 일으키지 않았으며, 황산을 사용하여 피복을 제거한 화학적 방법도 제거 과정이 주의깊게 수행되었을 때 광섬유의 초기 강도를 저하시키지 않음을 확인하였다. 이는 많은 수의 샘플에 있어서도 거의 같음을 Weibull 분포의 기울기를 통해서도 알 수 있었다. 본 연구에서 확증한 두 가지 방법은 높은 강도를 가지는 FBG 센서 제작에 사용될 수 있을 것으로 생각 된다.

참고문헌

1. Udd, E. (1995). Fiber Optic Smart Structures, John Wiley and Sons.
2. Heckman, D. W. (2000). "Interferometric fiber optic gyro technology (IFOG)," IEEE AES systems Magazine, 15, pp.23-28.
3. 정원석, 김성일, 김남식, 이희업 (2006). "Long-gauge 광섬유 센서를 이용한 철도교 PSC 거더의 처짐유추," 한국철도학회논문

- 집, 9, pp. 467-472.
4. IEC 60793-1-3: Optical fibers, Part I: Generic specifications, Section 3: Measuring methods for mechanical characteristics, First edition, 1995.
 5. Varelas, D., Limberger, H. G., Salathe, R. P. and Kotrotsios, C. (1997). "UV-induced mechanical degradation of optical fibres," *Electronics Letters*, 33, pp.804-806.
 6. Olshansky, R. and Maurer, D. R. (1976). "Tensile strength and fatigue of optical fibers," *Journal of Applied Physics*, 47, pp. 4497.
 7. Weibull, W. A. (1939). "The phenomenon of rupture in solids," *Ingvetensk Akad, Handl*, 153.
 8. Atkins R.M., Lemaire P. J., Erdogan T. and Mizrahi V. (1993). "Mechanisms of enhanced UV photosensitivity via hydrogen loading in germanosilicate glasses," *Electronics Letters*, 29, pp.1234-1235.
 9. Stone, J. (1987). "Interactions of hydrogen and deuterium with silica optical fibers: A review," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 5, pp.712.
 10. Yoon, H. J. and Kim C. G. (2007). "The mechanical strength of fiber Bragg gratings under the controlled UV laser conditions," *Smart Materials and Structures*, 16, pp.1315-1319.
 11. Matthewson, M. J., Kurkjian, C. R. and Hamblin, J. R. (1997). "Acid stripping of fused silica optical fibers without strength degradation," *Journal of Lightwave Technology*, 15, pp. 490-497.
- 접수일(2008년 7월 11일), 수정일(2008년 8월 11일),
게재확정일(2009년 2월 12일)