

FBG 센서를 내장한 스마트 강연선 개발

Development of Smart Tendon Instrumented with Optical FBG Sensors

김 재 민* · 김 영 상** · 김 현 우*** · 서 동 남**** · 윤 정 방*****

Jae-Min Kim · Young-Sang Kim · Hyoun-Wo Kim · Dong-Nam Seo · Chung-Bang Yun

ABSTRACT

This paper reports an attempt to develop 7-wire steel tendon which is instrumented with optical FBG sensors. The tendon is devised to replace the king cable, which is located in the center of the tendon, by a steel tube in which the FBG sensor are attached along the hole using a high-mobility polyester resin. The circular steel tube has typical of 5 mm outer diameter and 1 mm inner diameter, and can easily be manufactured by means of an pultrusion process. Using the tube, in this study, three different types of one-meter-long smart tendons are fabricated depending on mixture ratio of polyester resin and initiator. The performance of the FBG sensors as well as mechanical characteristics of the prototype are tested through the tensile test. Test results shows that the proposed smart tendon is in principle very effective for measuring the working strain of the tendon.+

Keywords: FBG sensor, Prestressing Tendon, Smart Cable, Smart Structure, Structural Health Monitoring

1. 서 론

사회기반시설의 건설목적은 자연과 조화를 이루면서 인간생활의 편의와 안락함을 추구하는 것이기 때문에, 이러한 시설물을 설계하거나 시공하는 경우에는 기능성 및 안전성이 중요한 요인으로 작용하게 된다. 그러나 대부분의 구조물은 사용기간 동안 발생하는 끊임없는 하중 변화와 구조부재의 열화로 인하여 점차적으로 그 기능 및 성능이 상실되며, 종종 인명과 재산을 위협하는 대형 붕괴사고를 일으키기도 한다. 이러한 상황에서 최근에는 구조물의 손상과 열화 정도, 또는 구조적인 문제 판단 시 필요한 자료를 습득하기 위하여 장단기 계측시스템이 많이 도입되고 있다. 그러나 전기저항식 변형률 게이지와 같은 종래의 센서는 시설물의 상태를 동시에 관측하기에는 시공이 불편하고 전기적인 잡음, 전기 케이블 길이에 따른 송신능력 저하 등 기술적 한계가 있다. 또한 상시계측을 위해서 변형률 게이지를 구조물에 장시간 포설해 놓은 경우 부식에 의해서 센서가 손상되는 문제점을 가지고 있다.

* 정회원 · 전남대학교 건설 · 환경공학부 부교수 Email: jm4kin@chonnam.ac.kr

** 전남대학교 건설 · 환경공학부 조교수 Email: geoyoskim@channam.ac.kr

*** 학생회원 · 전남대학교 건설 · 환경공학과 석사과정 Email: khw8113@nate.com

**** 전남대학교 건설 · 환경공학과 석사과정 Email: sdn1227@nate.com

***** 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 Email: ycb@kaist.ac.kr

최근에는 이상과 같은 종래 센서의 문제점을 극복하기 위해서 광센서를 사용하여 시설물의 상태를 계측하는 방법들이 개발되고 있다(구호본 등, 2001; Inaudi & Casanova, 2000; Ren et al., 2005). 이들 중 여러 지점의 변형률을 동시에 계측할 수 있는 광섬유 FBG 센서가 각광 받고 있다(송민호 등, 1998; 김민수 등, 1999; 이원재, 2000; 김기수 등, 2004; 강래형 등, 2006; Meltz, 1996; Calvert & Mooney, 2004). 광섬유 FBG 센서는 크기가 작고 수명이 반영구적이며 특히 전자기파에 의한 간섭을 받지 않기 때문에 가혹한 환경에서도 정밀한 측정이 가능하다는 장점이 있다. 또한 한 가닥의 광섬유에 수십 개의 센서를 동시에 제작하여 설치할 수 있으므로 시공이 용이하다는 장점이 있다. 그러나 광섬유센서의 이 같은 장점에도 불구하고 토목 또는 건설 현장에 널리 사용되지 못하고 있는 데, 그 이유는 다음과 같은 두 가지라고 할 수 있다: (1) 거친 건설현장에서 광섬유센서를 적절히 보호하는 방법이 많지 않다, (2) 광섬유 센서를 통해 시설물의 상태를 계측하는 장치인 인터로게이터(interrogator)의 가격이 고가이다. 최근에는 광섬유센서의 활용이 증가함에 따라 인터로게이터의 가격이 현실화되고 있어서 현장에서 광섬유센서를 적절히 보호할 수 있는 방법이 개발된다면 이 기술도 건설산업에 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 FBG 센서를 이용하여 긴장용 텐던의 변형률 계측을 위한 하나의 방법을 제안하고 이의 실용화를 위한 기초적인 연구를 수행하였다. 먼저 7연 강연선으로 구성된 긴장용 텐던의 킹케이블을 FBG 센서가 내장된 중공 킹케이블로 대체한 시편을 제작하고 인장실험을 통하여 본 연구에서 제안하는 스마트 텐던의 활용가능성을 살펴보았다. 그리고 FBG 센서를 킹케이블 내부에 부착할 때 사용하는 폴리에스터 레진과 경화제의 혼합비율에 따른 FBG 센서의 부착성능에 대해서도 고찰하였다.

2. FBG 센서를 이용한 케이블 변형률 모니터링

2.1 FBG 센서의 원리

FBG 센서는 광섬유에 그림 1과 같이 약 1mm~10mm 의 길이에 UV 레이저를 이용하여 일정한 간격(A)의 격자를 새긴다. 이렇게 만들어진 광섬유는 특정 파장에 대한 반사 특성을 가지는 Bragg Grating이 형성된다. FBG 센서가 새겨진 광섬유를 통해 특정 파장대의 레이저를 통과시키면 그림 1과 같이 센서의 격자간격에 비례하는 특정파장의 빛만을 반사하게 되므로, FBG 센서를 이용하여 변형률 또는 온도변화에 의한 격자간격의 변화를 감지할 수 있게 된다(Meltz, 2000).

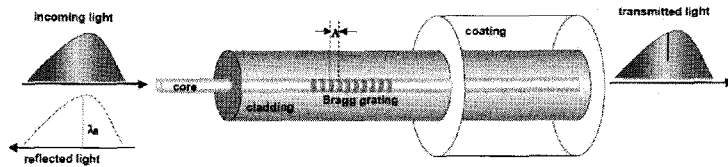


그림 1. FBG 센서의 측정원리

격자를 새길 때의 온도와 반사파 파장이 각각 T_b 및 λ_b 이고 계측 시 온도와 반사파 파장이 각각 T_m 및 λ_m 이라고 할 때, 이들 사이의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_m - \lambda_b = \lambda_b [\alpha^*(T_m - T_b) + \beta^* \epsilon] \quad (1)$$

여기서 $\alpha^* = \alpha + \xi$, $\beta^* = 1 - P_e$ 로서, α = 광섬유의 열팽창계수, ξ = 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학계수, P_e = 광탄성상수이다. 그리고 ε 은 광섬유에 작용된 변형률이다. 그러므로 계측시의 온도 (T_m)를 알고 있다면 식 (1)로부터 변형률(ε)을 구할 수 있다.

2.2 FBG센서를 이용한 케이블의 변형률 모니터링 사례

FBG 센서를 이용하여 교량의 케이블부재 (긴장재 또는 행거) 변형률을 계측하려는 시도는 광섬유센서가 실용화되면서부터 토목기술자들의 관심 대상이 되었으며, 토목공학의 다른 어떤 응용분야 보다 현장 적용이 활발한 분야라고 할 수 있다. 현재까지 케이블의 변형률 모니터링에 FBG 센서가 응용된 대표적인 사례는 다음과 같다.

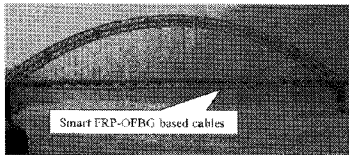
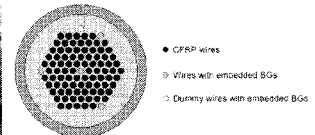
- FRP 복합소재에 FBG 센서를 삽입하여 응용한 사례
 - GFRP 록볼트 (그림 2(a); Nellen et al., 1999) : 직경 3, 8, 22mm, 길이 3~5m, 변형률 1.6%까지 측정
 - CFRP 케이블 (그림 2(b); Nellen et al., 1999) : 직경 56mm, 길이 56m, 변형률 0.8%까지 측정
 - FRP 케이블 (그림 2(c); Zhou et al., 2005) : 강케이블과 FRP-FBG 케이블 결합, 행거 케이블에 적용
- 케이블에 FBG 센서를 직접 부착하여 응용한 사례
 - PWS 케이블 (그림 2(d); Zhou et al., 2004) : 행거 케이블에 적용
 - PS 텐던 (그림 2(e); Li et al., 2005) : PS 텐던에 적용



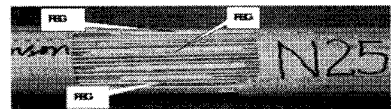
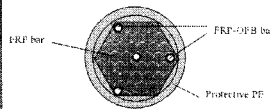
(a) Nellen et al. (1999)



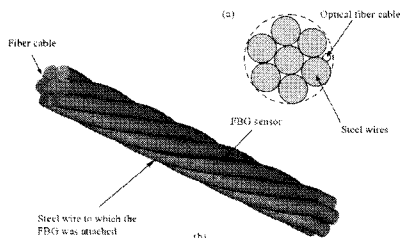
(b) Nellen et al. (1999)



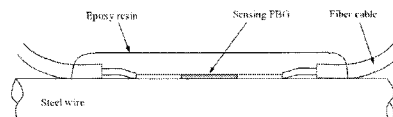
(c) Zhou et al. (2005)



(d) Zhou et al. (2004)



(a)



(b) Li et al. (2005)

그림 2. FBG센서를 케이블 변형률 계측에 응용한 사례

3. 스마트 강연선의 제작 및 인장시험

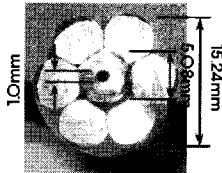
3.1 본 연구에서 제안하는 스마트 텐던

본 연구에서는 PSC 구조물 또는 강교량의 케이블로 가장 많이 사용되는 7연선으로 구성된 텐던을 대상으로 선정하였다. 이 강연선은 그림 3(a)와 같이 중앙에 킹케이블(king cable)이 위치하고 이를 중심으로 동일한 직경을 가지는 6개의 소선이 나선형으로 둘러싸는 방식으로 제작된다. 이 킹케이블은 직선을 유지한다.

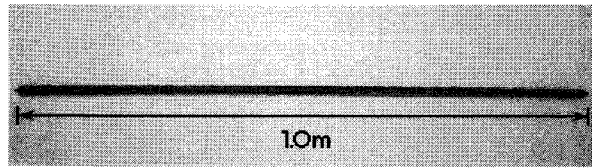
강연선 텐던의 변형률 계측을 위해 본 연구에서 제안하는 FBG 센서 설치방법은 다음과 같다: (1) 중앙 킹케이블을 중공 킹케이블(내경 약 1mm 정도)로 대체한다, (2) 중공 킹케이블에 FBG 센서와 같은 광섬유센서를 도입한다, (3) 유동성이 매우 좋은 접착제를 흡입하여 광섬유센서를 킹케이블에 부착한다. 본 연구에서 제안하는 스마트 텐던의 특징은 기존의 추가적인 센서 부착식이 아닌 강연선 자체의 부재 역할을 하면서 센서로의 역할을 하는 것이라고 할 수 있다.

3.2 스마트 텐던의 시편 제작

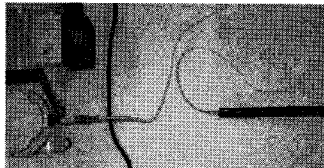
본 연구에서는 그림 3(a)와 같이 소선의 직경이 5.08mm이고 전체 텐던의 직경이 15.24mm인 텐던에 대한 시편을 제작하였다. 그림 3는 스마트 텐던의 1.0m 시편 제작 과정으로 텐던의 단면도 FBG센서 삽입, 접착제 충전 및 광섬유코드 연결상태를 보여주고 있다.



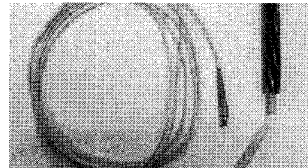
(a) 센서 설치 전 텐던 단면도



(b) 스마트 텐던 시편(1.0m)



(c) 진공흡입에 의한 킹케이블 내부 접착제 충전



(d) 텐던 단부에 FBG센서와 광섬유코드 연결

그림 3. 스마트 강연선의 단면 및 제작과정

3.3 킹케이블의 인장시험

스마트 텐던의 킹케이블은 인발공정을 통해 제작된 강 튜브이다. 따라서 이의 역학적인 특성은 구조용 강재로 다를 수 있다. 이 연구에서는 먼저 킹케이블의 역학적인 특성을 그림 4(a)와 같은 인장시험을 통하여 분석하였다. 인장시험결과, 그림 4(b)에 보인 바와 같이 이 연구에서 제작한 중공 킹케이블은 구조용 텐던으로 사용하는 케이블에 비해 강성은 거의 동일하나 강도와 연성능력이 매우 작음을 알 수 있었다. 그러나 그림 4(c)에서 알 수 있듯이 7연선으로 결합된 후에는 구조용 텐던과 큰 차이가 없었다. 이는 텐던에서 킹케이블이 차지하는 역할이 단면적 비율에 비례하여 1/7 뿐이기 때문이다. 따라서 본 연구에서 제안하는 스마트 텐던이 실용화되기 위해서는, 중공 킹케이블의 재료성능이 구조용 케이블과 동일할 필요는 없으나, 텐던의 공칭 긴장력 범위까지 선형탄성 거동을 할 수 있는 정도의 재료성능 개선은 이루어져야 함을 알 수 있었다.

이 연구에서는 또한 중공 킹케이블에 FBG 센서를 삽입하고 폴리에스터 레진을 이용하여 부착한 스마트 킹케이블에 대한 인장시험도 실시하였다. 시편은 외경 6.0mm, 내경 1.8mm, 길이 50cm이고 접착제인 폴리에스터 레진과 경화제를 혼합비율 5%로 섞은 후 흡입하여 시편을 제작 하였으며 접착제의 경화시간은 약 1시간 이내였다. 그림 5에서 알 수 있듯이 스마트 킹케이블에 내장된 FBG 센서와 외부에 부착된 변형률 게이지의 변형률이 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 Loading-Unloading-Reloading 시험을 통하여 킹케이블과 센서의 일체거동을 확인할 수 있었다.

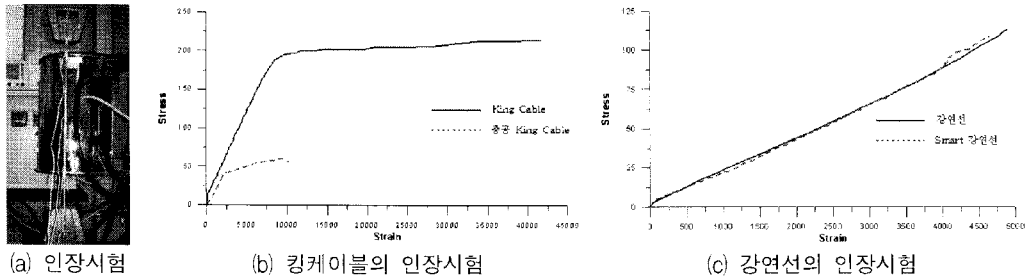


그림 4. 스마트 킹케이블 및 강연선의 인장시험 결과

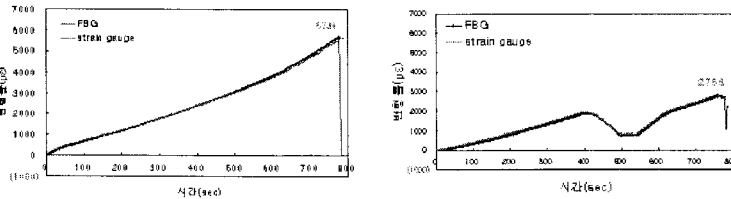


그림 5. 스마트 킹케이블에 대한 인장시험 결과

3.4 스마트 텐던의 인장시험

그림 3과 같이 제작된 길이 1.0m 스마트 강연선에 대한 인장시험을 그림 6(a)와 같이 실시하였다. 그림 6(b)는 폴리에스터-경화제 혼합비율이 약 1%인 스마트텐던에 대한 극한인장시험 결과이며, 그림 6(c)는 폴리에스터-경화제 혼합비율이 약 1/2인 경우의 시험결과이다. 그림 6(c)의 그래프를 보면 약 $400\mu\epsilon (= 0.04\%)$ 에서 FBG 센서와 접착체간 분리현상이 발생함을 알 수 있다 이로부터 이 연구에서 사용한 FBG센서의 최대 측정범위가 약 $6500\mu\epsilon (= 0.65\%)$ 이며 폴리에스터 경화제 혼합비율은 약 1% 이상이어야 함을 알 수 있었다.

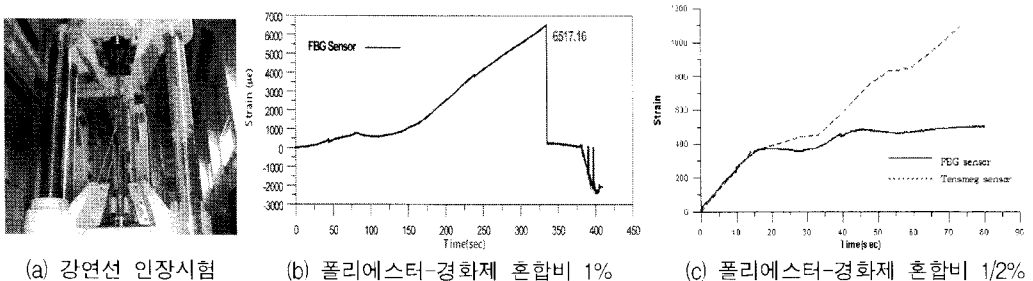


그림 6. 스마트 텐던에 대한 인장시험 결과

4. 결론

이 논문에서는 광섬유센서의 하나인 FBG센서와 구조용 긴장재로 사용되는 텐던을 결합한 스마트 텐던의 개념을 소개하고 이를 실용화하기 위한 일련의 기초연구결과를 정리하였다. 연구결과, 이 연구에서 제안하는 스마트 텐던은 다음과 같은 몇 가지 사항이 개선된다면 실무에 적용될 수 있을 것으로 판단되었다: (1) 변형률 $5000\mu\epsilon (= 0.5\%)$ 까지 선형탄성거동을 할 수 있도록 중공 킹케이בל의 재료성능 개선, (2) 폴리에스터 레진 흡입 공정의 작업성과 FBG 센서의 접착강도 유지를 보장하는 최적의 레진-경화제 혼합비 도출, (3) 실무에서 취급 부주의에 의한 광섬유센서 기능상실을 방지하기 위한 스마트 텐던 단부의 연결단자 개발.

감사의 글

본 연구는 2006년 스마트 사회기반시설 연구센터의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

참고문헌

- 강래형, 김대관, Rapp, S., Baier, H.H., 한계홍 (2006) 광섬유 변형률 센서를 이용한 구조물 동적 변위 추정, **한국소음진동공학회 논문집**, 16(12), pp. 1279~1285.
- 김기수, 송영철, 방기성 (2004) 광섬유 센서 및 그 응용, **기계저널**, 대한기계학회, 44(6), pp. 53~58.
- 김민수, 권일범, 최만용 (1999) 광섬유 브래그격자센서에 의한 구조물의 변형률 측정, **한국구조물진단학회 학술발표회 논문집**, pp. 11~16.
- 구호본, 백용 (2001) 광섬유 센서를 이용한 산사태 예측기법 개발, **한국건설기술연구원**.
- 송민호, 이상배, 최상삼, 이병호 (1998) 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 동적 스트레인 신호의 해석, **전자공학회논문집**, 35(D1), pp. 79~83.
- 이원제 (2000) 광섬유센서를 이용한 매입말뚝의 하중전이 측정 및 지지력 산정 연구, **고려대학교 박사학위 논문**.
- Calvert, S. and Mooney, J. (2004) Bridge structural health monitoring system using fiber grating sensors: development and preparation for a permanent installation, *SPIE Proceedings*, 5391, pp. 61~71.
- Inaudi, D., and Casanova, N. (2000) Geo-structural monitoring with long-gage interferometer sensors, *SPIE Proceedings*, 3995, pp. 164~174.
- Li, E., Xi, J., Chicharo, J., Liu, T., Li, X., Jiang, J., Li, L., Wang, Y., and Zhang, Y. (2005) The experimental evaluation of FBG sensor for strain measurement of prestressed steel strand, *SPIE Proceedings*, 5649, pp. 463~469.
- Meltz, G. (1996) Overview of fiber grating based sensors, *SPIE Proceedings*, 2838, pp. 2~22.
- Nellen, P.M., Bronnimann, R., Frank, A., Mauron, P., and Sennhauser, U. (1999) Structurally Embedded Fiber Bragg Gratings: Civil Engineering Application, *SPIE Proceedings*, 3860, pp. 44~54.
- Ren, L., Li, N-H., Sun, L., Li, D-S. (2005) Development of tube-packaged FBG strain sensor and application in the vibration experiment of submarine pipeline model, *SPIE Proceedings*, 5770, pp. 199~204.
- Zhou, Z., Zhang, Z., Deng, N., Zhao, X., Li, D., Wang, C., and Ou J. (2005) Applications of FRP-OFBG sensors on bridge cables, *SPIE Proceedings*, 5765, pp. 668~677.
- Zhou, Z., Zhao, X., Wang, C., Zhang, Z., Hu, Q., and Ou, J. (2004) A new kind of smart bridge cable based on FBG sensors, *SPIE Proceedings*, 5502, pp. 196~199.