

# 광섬유센서가 내장된 강연선을 이용한 교량의 장력 모니터링 방법

## A Methodology for Monitoring Prestressed Force of Bridges Using OFS-embedded Strand

김재민† 김현우\* 김영상\*\* 김진원\*\*\* 윤정방\*\*\*\*

Kim, Jae-Min Kim, Hyun-Woo Kim, Young-Sang Kim, Jin-Won Yun, Chung-Bang

(논문접수일 : 2008년 6월 13일 ; 심사종료일 : 2008년 6월 20일)

### 요지

이 연구에서는 교량 상부구조물의 보수·보강에 많이 사용되는 7연 강연선의 공용중 긴장력 관리를 위한 새로운 방법은 제안하였다. 제안된 스마트 강연선은 기존 강연선의 중앙 킹와이어를 강제튜브로 대체하고, 강제튜브의 내부에 FBG 광섬유센서를 설치하여 강연선의 변형률을 측정할 수 있도록 하였다. 내장된 센서를 통하여 이 스마트 강연선의 변형률을 쉽게 측정할 수 있으므로, 공용중 강연선의 긴장력을 모니터링할 수 있다. 본 연구에서 제안된 장력 모니터링 방법의 효용성을 증명하기 위하여 FBG센서 2개가 내장된 길이 7.0m인 스마트 강연선을 제작하고, 이를 길이 6.4m, 높이 0.6m인 RC T형 모형거더에 외장형 텐던으로 적용하였다. 그리고 이 시험거더에 대한 재하-제하시험을 실시하고 로드셀에서 계측된 긴장력과 스마트 강연선을 이용하여 예측한 긴장력을 비교하였다. 비교 결과, 제안된 스마트 강연선은 긴장력이 작용된 강연선의 장력을 정확하게 모니터링하는데 유용함을 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : FBG센서, 스마트 강연선, RC 거더, 공용중 안전진단

### Abstract

This study proposes a novel method for in service evaluation of tension force of a prestressed 7-wire strand which is frequently employed for retrofitting bridge superstructure. The smart strand is made by replacing the straight king wire of the strand with an instrumented steel tube in which the FBG sensor is embedded. Since the strain of the smart strand can easily be measured using the sensor, it is possible to monitor tension force of the strand during the service. For the sake of demonstrating effectiveness of the proposed strand, we came up with a 7.0m long prototype with 2 FBG sensors, and it is applied as an external tendon to a 6.4m long and 0.6 high RC T-shaped beam. A loading-unloading test has been carried out, and estimated tension forces using the smart strand are compared with measured forces by load cell. The comparison showed that the proposed smart tendon is useful and accurate for monitoring tension force of the prestressed tendon.

**Keywords** : *FBG sensor, smart strand, rc girder, in-service evaluation*

### 1. 서론

최근에 교량 구조물의 손상과 열화 정도, 또는 구조적인 문제 판단 및 기초자료를 습득하기 위해 다양한 형식의 변형

률계측시스템이 도입되고 있다. 그러나 기존에 많이 사용되던 전기저항식 스트레인게이지는 장기적인 내구성 확보에 어려움이 있고 시공이 불편하며, 전기적인 잡음 및 전자기파의 노출시 계측값의 신뢰성이 급격히 저하되는 단점 등이 개선

† 책임저자, 정회원 · 전남대학교 건설·환경공학부 부교수

Tel: 061-659-3245 ; Fax: 061-659-2917

E-mail: jm4kim@chonnam.ac.kr

\* 학생회원 · 전남대학교 건설·환경공학과 석사과정

\*\* 전남대학교 건설·환경공학부 조교수

\*\*\* 학생회원 · 전남대학교 건설·환경공학과 석사과정

\*\*\*\* 정회원 · KAIST 건설 및 환경공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 8월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

되어야 한다.

이에 따라 스트레인게이지와 같은 종래 센서의 문제점을 보완한 광섬유센서를 이용하여 구조물의 상태를 진단하기 위한 계측 방법들이 많이 연구되고 있다(구호본 등, 2001; 김기수, 2007; Calvert 등, 2004; Li 등, 2005; Nellen 등, 1999a; 1999b; Ren 등, 2005; Zhou 등, 2003; 2004; 2005). 광섬유센서는 크기가 작고 가벼우며 전자기파와 부식의 영향이 없고, 매우 높은 감도와 하나의 광학채널에 수십개의 센서 설치가 가능한 장점이 있다. 더욱이 광섬유센서는 온도와 변형을 뿐만 아니라 다양한 물리량 측정이 가능하며 증폭기 없이도 신호 손실이 거의 없이 원거리까지 전송이 가능하다. 현재 광섬유센서를 이용하여 물리량을 측정하는 센서 패키지 상품이 다양하게 개발되고 사용되고 있다. 그러나 광섬유 및 광섬유센서는 근본적으로 매우 가는 광섬유(직경 약 0.25mm)를 이용하므로 취급 부주의에 의해 쉽게 파손될 수 있다. 따라서 이를 거친 건설현장에 적용하기 위해서는 광섬유센서와 광섬유를 보호할 방안이 필요하다.

이 연구에서는 광섬유센서를 이용하여 교량구조물에 사용되는 강연선의 변형을 계측을 위한 하나의 방법을 제안하였다. 그리고 이의 실용화를 위한 기초적인 연구로서 스마트 강연선을 RC T-형 모형거더의 보강을 위한 수단으로 적용하고 강연선의 공용중 긴장력을 예측하는 방법에 대해 연구하였다. 이를 위하여 먼저 7연선으로 이루어진 PS강연선( $\phi$  15.24mm)의 중앙 소선을 광섬유브래그격자(FBG) 센서를 내장한 소선으로 대체한 길이 7.0m인 스마트 강연선을 제작하였다. 그리고 길이 6.4m RC T-형 모형거더에 제작된 스마트 강연선을 보강을 위한 외장형 강연선으로 시공하였다. 성능시험은 강연선의 긴장력을 변화시키면서 FBG센서와 로드셀을 이용하여 각각 변형률과 긴장력을 계측하는 방법으로 수행되었다. 스마트 강연선의 성능은 로드셀 계측값과 FBG센서의 계측값에 기초한 예측긴장력을 비교하여 검토되었다. 마지막으로 FBG센서의 온도 민감도에 대해 간단히 고찰하였다.

## 2. 스마트 강연선

### 2.1 스마트 강연선의 구조

본 연구에서 제안하는 스마트 강연선은 RC 구조물 또는 교량 구조물에 많이 사용되는 7연선으로 구성된 강연선을 대상으로 선정하였다. 이 강연선은 그림 1과 같이 중앙에 직선을 유지하는 킹와이어(king wire)가 위치하고 이를 중심으로 6개의 소선이 나선형으로 둘러싸는 방식으로 제작된다.

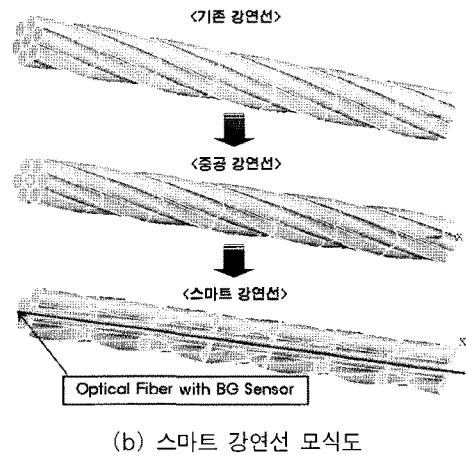
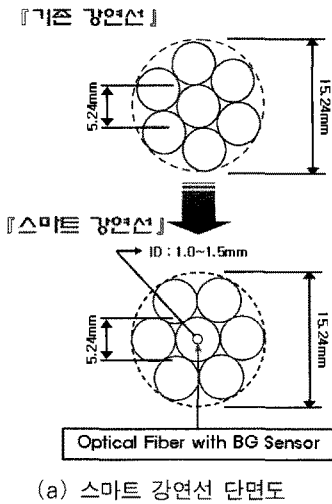


그림 1 스마트 강연선의 구조

스마트 강연선은 그림 1(b)와 같이 기존 강연선의 중앙 킹와이어를 제거하고 킹와이어와 같은 외경을 가지는 강계튜브(steel tube)인 중공 킹와이어로 대체한다. 이때 중공 킹와이어의 내경은 약 1~2mm이며, 이렇게 대체된 강연선이 이 논문에서는 중공 강연선이라고 부르기로 한다. 중공 강연선이 제작되면 광섬유센서인 FBG센서를 도입하고, 진공펌프를 이용하여 유동성이 매우 좋은 접착제를 주입하여 FBG센서와 중공 강연선을 일체화하여 스마트 강연선을 제작한다.

본 연구에서 제안하는 스마트 강연선의 특징은 기존의 추가적인 센서 부착방식이 아닌 강연선 자체가 부재의 역할을 하면서 센서로서의 역할을 하는 것이라고 할 수 있다(김재민 등, 2007; 김현우 등, 2008).

### 2.2 FBG 센서의 기본이론

FBG센서는 광섬유에 UV레이저 광원을 조사하여 광섬유 코어의 굴절률을 주기적으로 변화시킨 것을 말한다. 그림 2

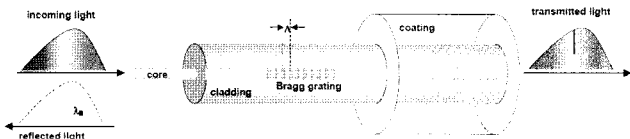
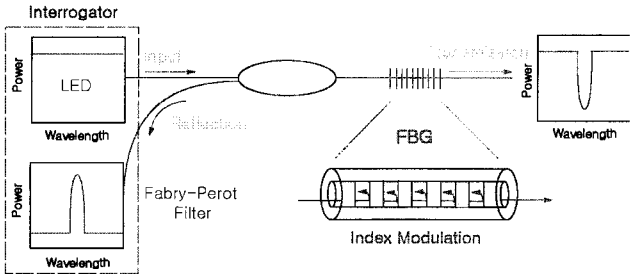
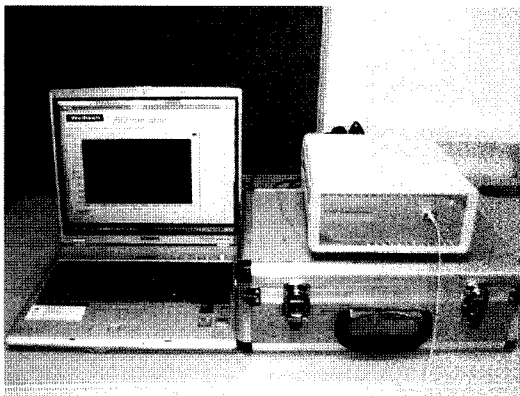


그림 2 FBG센서의 측정원리(Nellen 등, 1999a)



(a) FBG센서시스템의 구성



(b) FBG 센서 계측시스템 및 Interrogator

그림 3 FBG 센서 계측시스템

는 FBG센서의 원리를 도시한 것으로, 광원을 광섬유의 종방향으로 입사시킬 경우 브래그 조건을 만족하는 파장만을 반사하고, 그 외의 파장은 그대로 통과시키는 특성을 갖는다. 이때 반사되는 파장  $\lambda_b$ 는 브래그 격자 간격(그림 2의  $\Lambda$ )에 비례한다. 이 같은 특성을 이용하여 브래그 격자에서 변형률과 온도변화를 광원에서 검출되는 파장  $\lambda_b$ 로 감지할 수 있다.

브래그 파장과 격자에 새겨진 위치에서 온도 및 변형률 사이의 관계는 다음과 같다.

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

여기서  $T_b$ 와  $\epsilon_b$ 는 반사파장  $\lambda_b$ 일 때의 온도와 변형률이며,  $\lambda_m$ 은 온도  $T_m$ 과 변형률  $\epsilon_m$ 일 때 파장이다. 그리고  $\alpha^* = \alpha + \xi$ ,  $\beta^* = 1 - P_e$ 로서 광섬유의 재료특성에 따라 결정되는 상수이며,  $\alpha$  = 광섬유의 열팽창계수,  $\xi$  = 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학계수,  $P_e$  = 광탄성상수이다. 일반적으로 많이 사용되는 실리카 유리 광섬유의 재료상수는 다음과

같다:  $\alpha = 0.510 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,  $\xi = 8.310 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,  $P_e = 0.22$ . 그러므로 계측시의 온도( $T_m$ )를 알고 있다면 식 (1)로부터 다음과 같이 변형률( $\epsilon_m$ )을 구할 수 있다.

$$\epsilon_m = \epsilon_b + \frac{1}{\beta^*} \frac{\lambda_m - \lambda_b}{\lambda_b} - \frac{\alpha^*}{\beta^*} (T_m - T_b) \quad (2)$$

그림 3은 FBG센서 계측시스템을 예시한 것으로 임의의 대역폭을 가지는 파장을 광섬유에 입사하는 광원부, 외부의 온도나 변형률 등의 물리적 변화를 감지하는 센서부, 센서에서 반사되어 들어오는 신호를 검출하는 검출부, 검출된 신호를 처리하는 신호처리부로 구성된다. 본 연구에서는 광원부와 검출부는 인터로게이터(interrogator)가 동시에 수행하고 검출된 신호를 컴퓨터로 전송하는 방식을 사용하였다

### 2.3 스마트 강연선의 단면감소에 따른 수치해석

이 연구에서는 스마트 강연선의 제작 전 킹와이어 중앙 단면감소에 따른 응력변화를 검토하기 위하여 유한요소프로그램인 ANSYS 이용하여 수치해석을 수행하였다. 그림 4(a)는 응력해석을 위한 해석모델로서 PC강연선은 7연선이며, 직경 15.24mm, 길이 1.0m, 꼬임길이 20cm이다. 해석모

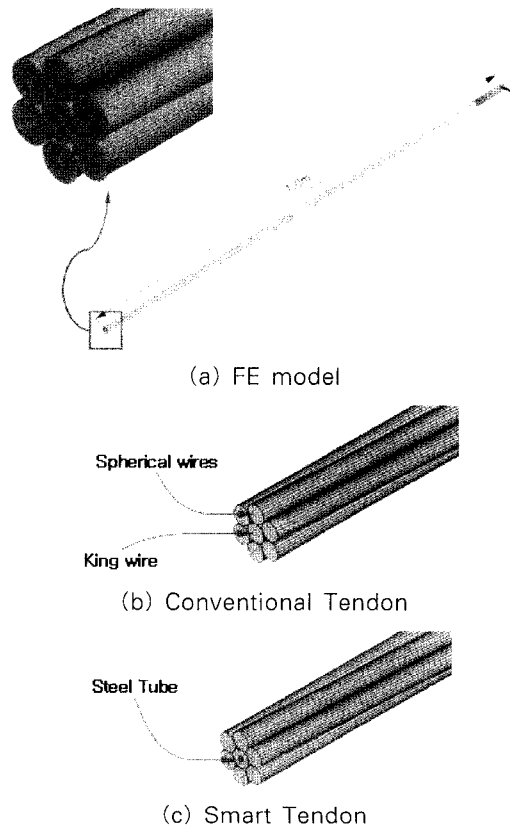


그림 4 ANSYS를 이용한 강연선의 응력해석 모델

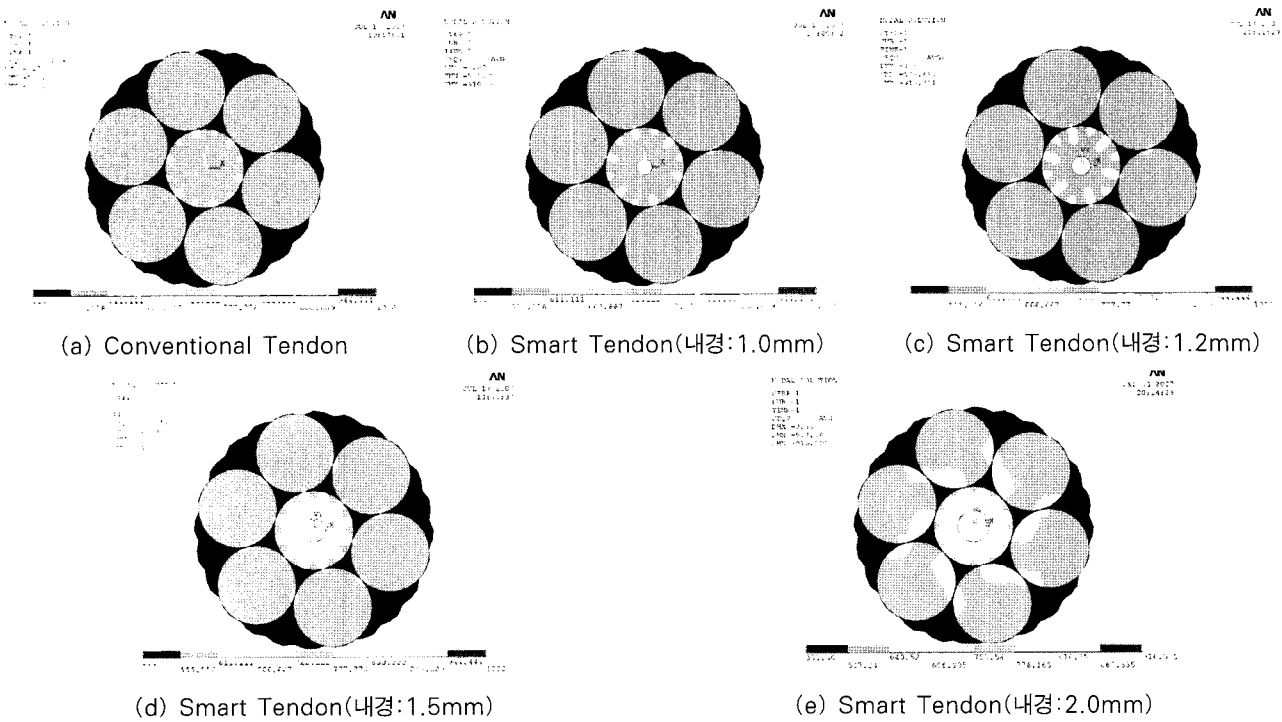


그림 5 강연선 킹와이어의 단면감소에 따른 등가응력 분포

표 1 강연선의 중앙 킹와이어 단면감소에 따른 응력의 변화

| 구 분                         | Conventional Tendon | 스마트 강연선            |                    |                    |                    |
|-----------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                             |                     | 내경 1.0mm           | 내경 1.2mm           | 내경 1.5mm           | 내경 2.0mm           |
| 단면적 ( $mm^2$ )              | 141.878             | 141.093<br>(0.994) | 140.747<br>(0.992) | 140.111<br>(0.988) | 138.737<br>(0.978) |
| 최대 등가응력 (MPa)               | 892.770             | 910.962<br>(1.020) | 918.711<br>(1.029) | 917.795<br>(1.028) | 916.505<br>(1.027) |
| 킹와이어의 중심부<br>최대등가응력 (MPa)   | 770.656             | 775.870<br>(1.007) | 778.111<br>(1.010) | 782.013<br>(1.015) | 791.158<br>(1.027) |
| 나선 와이어의 중심부<br>최대등가응력 (MPa) | 754.848             | 759.820<br>(1.006) | 761.627<br>(1.009) | 765.508<br>(1.014) | 773.165<br>(1.024) |

주: 괄호 안의 값은 중공 강연선의 기존 강연선에 대한 비율이며 등가응력은 Von Mises 응력임.

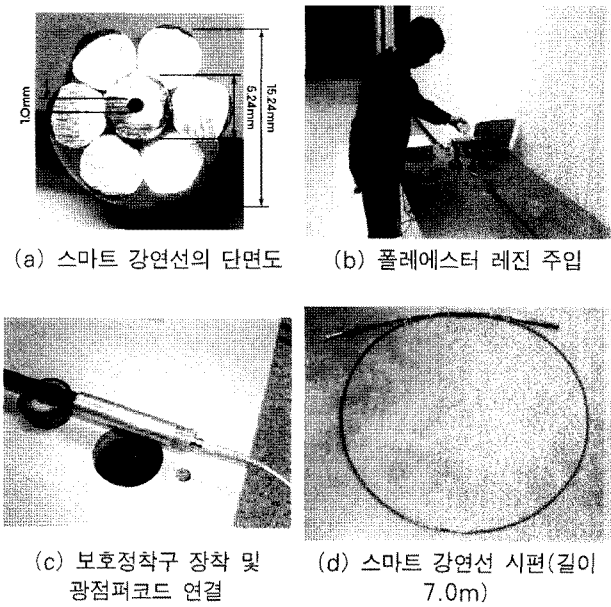
델에서 각각의 소선이 접하는 절점에 대하여 Contact기능을 이용하여 접촉거동을 묘사하였다. 그리고 오른쪽 단면은 완전구속으로 설정하였으며, 왼쪽단면은 10tonf 긴장력을 등가압력으로 작용하였다. 응력해석은 중앙 강관의 내경을 1.0mm에서 2.0mm까지 변화시키면서 길이방향 중앙단면의 응력을 검토하였다.

스마트 강연선의 단면감소에 따른 수치해석 결과는 그림 5 및 표 1과 같다. 동일한 긴장력(최대하중:10tonf)에 대하여 강연선의 단면감소에 따른 0.5m지점 중앙단면의 등가응력 해석결과, 그림 5와 표 1로부터 알 수 있듯이 중공 강연선의 내경이 커짐에 따라 응력이 다소 증가 하지만 그 크기는 기존 강연선의 응력에 비해 3%이상 증가하지 않음을 확인할 수 있다.

### 3. 스마트 강연선의 제작

이 연구에서 제안하는 스마트 강연선을 그림 6(a)와 같이 강연선의 중앙 킹와이어 소선을 강관으로 대체하고 광섬유와 FBG센서를 내부에 삽입하여 그림 6과 같이 제작하였다. 이 스마트 강연선의 길이는 7.0m이며 제작순서는 다음과 같다: (1) 내경 1mm, 외경 5.2mm의 중공 킹와이어 제작, (2) 7연 강연선의 킹와이어를 중공 킹와이어로 교체, (3) FBG센서를 중공 킹와이어에 삽입, (4) 유동성이 좋은 접착제를 흡입하고 양생하여 광섬유 및 광섬유센서를 중공 킹와이어와 일체화.

스마트 강연선 제작에 사용된 FBG센서는 위상 마스크 방법(phase mask method)으로 제작된 센서이며, 기준 파장은 각각  $\lambda_1 = 1535.848nm$ ,  $\lambda_2 = 1549.176nm$ 이고, 반사율



(a) 스마트 강연선의 단면도 (b) 폴리에스터 레진 주입  
(c) 보호정착구 장착 및 광섬유코드 연결 (d) 스마트 강연선 시편(길이 7.0m)

그림 6 스마트 강연선 단면 및 제작과정

은 각각 14.83dB, 13.62dB으로 95% 이상의 반사율을 가진 센서를 사용하였다.

본 연구에서 유동성 접착제로 사용한 폴리에스터 레진은 열경화성 플라스틱 수지의 일종으로 경화제와 결합하여 화학 반응으로 굳어진다. 경화된 폴리에스터 레진은 인장강도 및 부착강도가 크며 수밀성과 내구성이 뛰어나며 경화제의 양을 조절하여 경화시간을 조절할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이 연구에서는 폴리에스터 레진-경화제의 2% 혼합비로 배합한 후 진공펌프를 이용하여 감압방법으로 충전하였다. 마지막으로 긴장력의 효율적 관리를 위해 볼트 형식의 강봉인 만손(fitting anchor)을 그림 6(d)와 같이 부착하였다.

#### 4. RC T-형 모형거더 시험

##### 4.1 RC T-형 모형거더의 제원

스마트 강연선이 현장에서 긴장재의 장력측측과 모니터링을 목적으로 사용 가능성을 살펴보기 위하여 그림 7과 같이 RC T-형 모형거더에 외장형 방식으로 강연선을 설치하여 성능시험을 실시하였다. 이 모형거더는 철근콘크리트로 제작되었으며 길이 6.4m, 상부 플랜지 폭 0.71m, 하부 플랜지 폭 0.18m, 높이 0.60m이다(김정태 등, 2008).

##### 4.2 RC T-형 모형거더 인장시험 및 긴장력 예측

이 연구에서는 그림 8과 같이 T-형 모형거더의 하부에 좌우 각각 1개의 강연선을 설치하고 유압잭을 이용하여 긴장력을 도

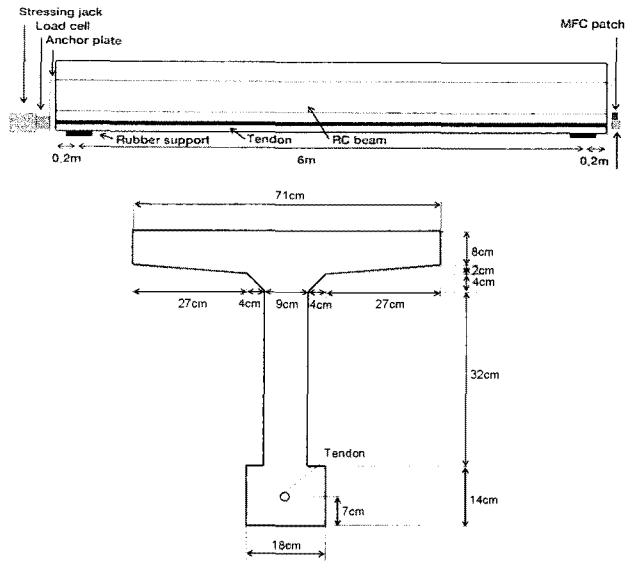
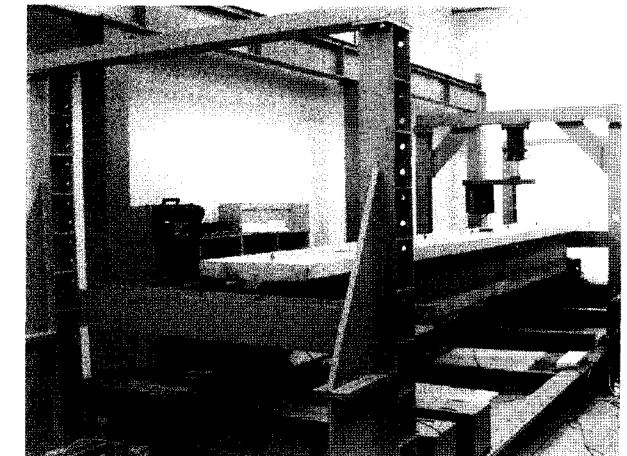
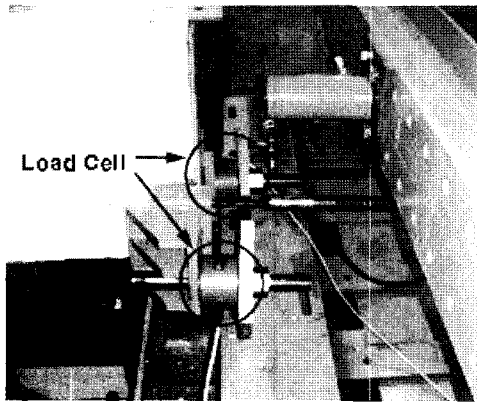


그림 7 RC T-형 모형거더 (김정태 등, 2008)

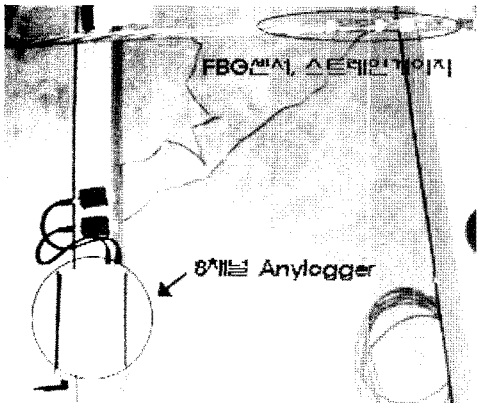


입하였다. 이 중 한쪽 강연선은 그림 8과 같이 스마트 강연선을 시공하였다. 그리고 FBG 센서가 설치된 위치의 강연선 외부에 스트레인게이지를 부착하였다. 강연선 긴장력은 Loading-Unloading-Reloading 시험을 통하여 스마트 강연선의 성능 시험을 실시하였다. 이 때 긴장력은 최대 4.0tonf까지 작용하였으며 편심하중을 최소화하기 위해 하나의 핸드펌프로 두 개의 유압실린더를 제어하는 방식으로 시험하였다. 시험에 사용된 센서는 FBG센서, 스트레인게이지, 긴장력 측정을 위한 로드셀 등이다.

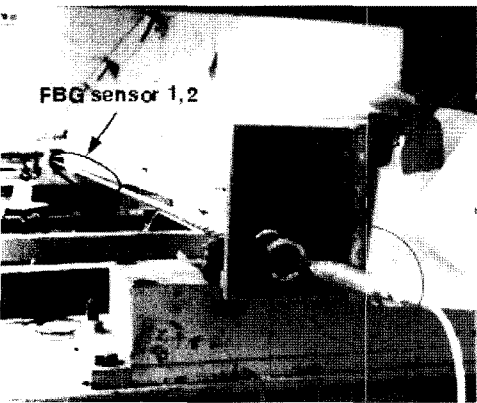
그림 9는 모형 거더의 성능시험 결과로서 FBG센서와 스트레인게이지의 계측결과를 비교한 것이다. 이 그림으로 부터 스마트 강연선 내부에 설치된 FBG 1, 2 센서와 스트레인게이지 1, 2에 의한 예측 긴장력이 매우 잘 일치하여 FBG센서가 강연선과 일체로 거동하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 10은 인장시험을 통해 계측된 변형률( $\epsilon_{FBG}$ )로 부터 아래 식 (3)을 이용하여 긴장력( $P_{estimated}$ )과 로드셀에 의해



(a) 로드셀 설치



(b) FBG센서 및 스트레인게이지



(c) 보정착장치 및 광섬유코드 연결  
그림 8 RC T-형 모형거더 인장시험 준비

계측된 긴장력( $P_{measured}$ )를 비교한 결과이다.

$$P_{estimated} = E_{ps} A_{ps} \epsilon_{FBG} \quad (3)$$

여기서  $E_{ps}$ 는 강연선 탄성계수,  $A_{ps}$ 는 강연선의 단면적,  $P_{estimated}$ 는 추정 긴장력이다. 인장시험으로 얻어진 FBG센서 변형률과 식 (3)을 이용하여 추정한  $P_{estimated}$ 를  $P_{measured}$ 와 비교한 결과, 스마트 강연선이 최대 인장력의 5% 오차 범위 내에서 긴장력을 매우 양호하게 추정할 수 있는 것으로

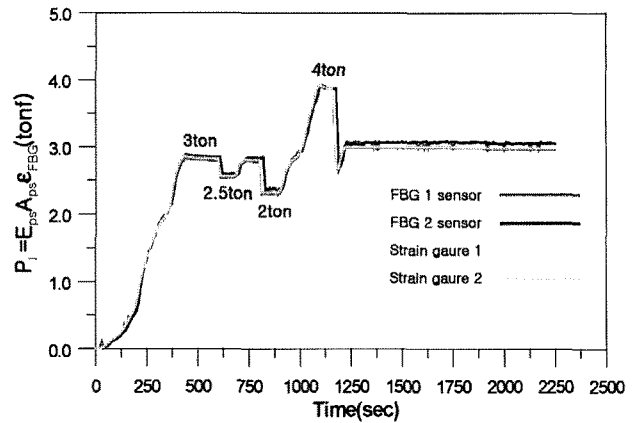


그림 9 모형거더에 시공된 스마트 강연선의 Loading-Unloading-Reloading 시험결과

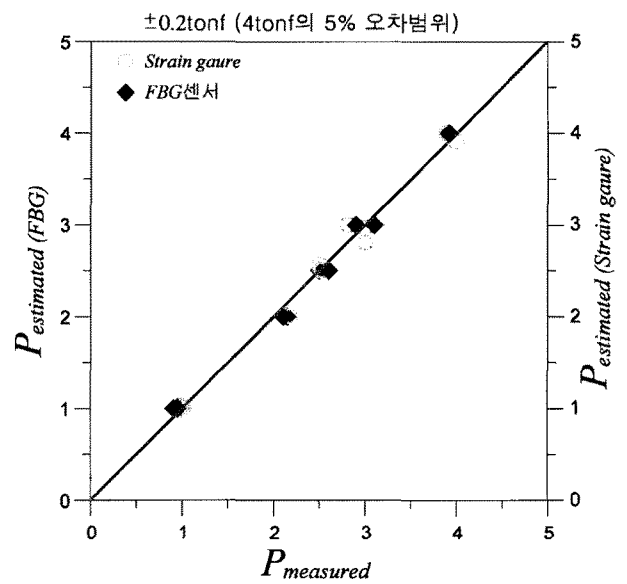


그림 10 RC T-형 모형거더 인장시험 결과

나타났다.

### 4.3 FBG센서를 이용한 장력 모니터링에서 온도보정의 중요성

식 (1)에 보이는 바와 같이 FBG센서의 파장은 온도변화에도 민감하게 반응한다. 이 연구에서는 온도변화에 의한 파장의 변화를 알아보기 위하여 앞에서 사용한 RC T-형 모형거더를 이용하여 민감도시험을 실시하였다. 시험방법은 인장시험과 동일한 방법으로 Loading 시험과 Loading-Unloading-Reloading 시험을 각각 실시한 후, 4.0tonf의 긴장력을 유지한 상태에서 FBG센서가 설치되어 있는 부분에 그림 11과 같이 헤어드라이어기를 이용하여 센서부(FBG 및 스트레인게이지)를 가열하였다.

시험결과, 그림 12와 같이 온도변화에 의해 FBG센서는 매우 민감하게 반응하여 강연선의 장력추정 오차가 매우 커

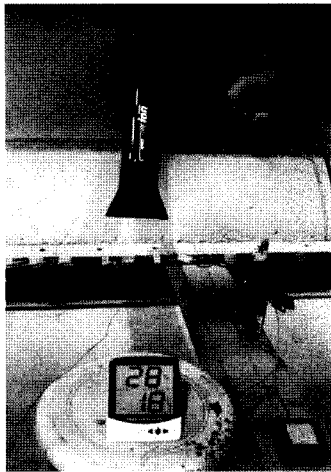


그림 11 스마트 강연선의 부분 가열

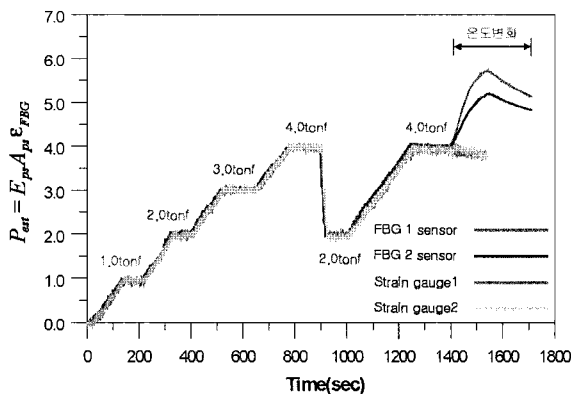
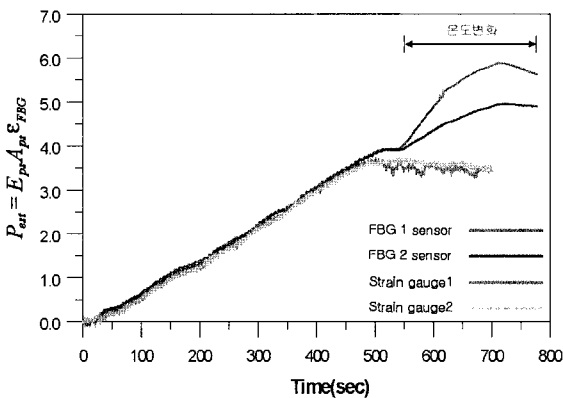


그림 12 스마트 강연선의 온도변화 민감도시험 결과

지는 것으로 나타났다. 반면에 스트레인게이지는 온도변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이로부터 온도보정을 하지 않을 경우 스마트 강연선의 긴장력 예측에 있어서도 큰 오차가 발생할 수 있다는 사실을 알 수 있었다.

### 5. 결 론

이 연구에서는 FBG센서가 내장된 스마트 강연선을 제시하고 이를 이용한 새로운 교량의 장력 모니터링 방법을 제안

하였다. 또한 이를 RC T-형 모형거더에 보강을 위한 보수재로 시공하고 공용중인 장력계측성능을 실험적으로 검증하였다. 성능시험 결과, FBG센서와 스트레인게이지의 예측 긴장력이 매우 잘 일치하여 FBG센서와 강연선이 일체로 거동함을 확인할 수 있었다. 그리고 본 연구에서 제안하는 스마트 강연선을 이용한 추정 긴장력과 로드셀에서 측정된 긴장력을 비교한 결과 최대 긴장력의 5% 오차범위에서 매우 양호하게 추정함을 확인하였다. 또한 온도변화 민감도시험을 통하여 FBG센서가 온도에 민감하게 반응함을 확인함으로써 온도보정을 하지 않을 경우 스마트 강연선의 긴장력 예측에 있어서 오차가 커질 수 있음을 알 수 있었다.

### 감사의 글

이 연구는 2007년 스마트사회기반시설 연구센터(SISTeC)의 지원에 의해 이루어진 것입니다. 그리고 RC T-형 모형거더 시험은 부경대학교 스마트구조공학연구소의 지원을 받아 수행되었습니다. 시험과정에서 많은 도움을 준 김정태 교수님과 홍동수씨에게 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

구호본, 백용 (2001) 광섬유 센서를 이용한 산사태 계측기법 개발, 한국건설기술연구원.  
 김기수 (2007) 광섬유센서를 이용한 사회기반시설 구조물의 스마트 모니터링 기법, 미래의 토목공학, 대한토목학회 차연과 문명의 조화, 55(4), pp.81~91.  
 김정태, 홍동수, 박재형, 조현만 (2008) PSC 거더의 진동기반 긴장력 손실 모니터링, 한국전산구조공학회 논문집, 21(1), pp.83~90.  
 김재민, 김영상, 김현우, 서동남, 윤정방 (2007) FBG 센서를 내장한 스마트 강연선 개발, 한국전산구조공학회 논문집, 20(2), pp.33~38.  
 김현우, 김재민, 김진원, 김영상, 윤정방 (2008) 광섬유센서가 내장된 강연선을 이용한 교량의 장력 모니터링 방법, 한국전산구조공학회 논문집, Session6 Smart Structures, pp.133~138.  
 Calvert, S., 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.  
 Li, E., Xi, J., Chicharo, J., Liu, T., Li, X., Jiang, J., Li, L., Wang, Y., 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., Anderegg P., Bronnimann, R., Meier U., Sennhauser, U.** (1999a) *Fiber Optical Bragg Grating embedded in CFRP wires*. SPIE Proceedings, 3870, pp.440~449.
- Nellen, P.M., Bronnimann, R., Frank, A., Mauron, P., Sennhauser, U.** (1999b) *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., 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., Ou, J.** (2004) *A new kind of smart bridge cable based on FBG sensors*, SPIE Proceedings, 5502, pp.196~199.
- Zhou, Z., Thomas W.G., Luke Hsu, Ou J.P.** (2003) *Techniques of advanced FBG sensors : fabrication, demodulation, encapsulation and their application in the structural health monitoring of bridges*, Pacific Science Review, 5, pp.116~121.