

## 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용한 그라운드 앵커의 장기 장력모니터링을 위한 온도보상

### Temperature Compensation of Optical FBG Sensors Embedded Tendon for Long-term Monitoring of Tension Force of Ground Anchor

성 현 중<sup>1</sup> Sung, Hyun-Jong

김 영 상<sup>2</sup> Kim, Young-Sang

김 재 민<sup>3</sup> Kim, Jae-Min

박 귀 현<sup>4</sup> Park, Gui-Hyun

#### Abstract

Ground anchor method is one of the most popular reinforcing technology for slope in Korea. For the health monitoring of slope which is reinforced by permanent anchor for a long period, monitoring of the tension force of ground anchor is very important. However, since electromechanical sensors such as strain gauge and V/W type load cell are also subject to long-term risk as well as suffering from noise during long distance transmission and immunity to electromagnetic interference (EMI), optical FBG sensors embedded tendon was developed to measure strain of 7-wire strand by embedding FBG sensor into the center king cable of 7-wire strand. This FBG sensors embedded tendon has been successfully applied to measuring the short-term anchor force. But to adopt this tendon to long-term monitoring, temperature compensation of the FBG sensors embedded tendon should be done. In this paper, we described how to compensate the effect in compliance with the change of underground temperature during long-term tension force monitoring of ground anchors by using optical fiber sensors (FBG: Fiber Bragg Grating). The model test was carried out to determine the temperature sensitivity coefficient ( $\beta'$ ) of FBG sensors embedded tendon. The determined temperature sensitivity coefficient  $\beta' = 2.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$  was verified by comparing the ground temperatures predicted from the proposed sensor using  $\beta'$  with ground temperatures measured from ground thermometer. Finally, temperature compensations were carried out based on  $\beta'$  value and ground temperature measurement from KMA for the tension force monitoring results of tension type and compression type anchors, which had been installed more than 1 year before at the test site. Temperature compensated tension forces are compared with those measured from conventional load cell during the same measuring time. Test results show that determined temperature sensitivity coefficient ( $\beta'$ ) of FBG sensors embedded tendon is valid and proposed temperature compensation method is also appropriate from the fact that the temperature compensated tension forces are not dependent on the change of ground temperature and are consistent with the tension forces measured from the conventional load cell.

#### 요 지

그라운드 앵커공법은 현재 우리나라에서 가장 일반적으로 사용되는 사면보강공법들 중 하나이다. 앵커로 보강된

1 정회원, 전남대학교 일반대학원 건설환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Chonnam National Univ.)

2 정회원, 전남대학교 해양토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Marine & Civil Engrg., Chonnam National Univ., Tel: +82-61-659-7248, Fax: +82-61-659-7329, geoyoungkim@jnu.ac.kr, 교신저자)

3 비회원, 전남대학교 해양토목공학과 교수 (Prof., Dept. of Marine & Civil Engrg., Chonnam National Univ.)

4 비회원, 전남대학교 일반대학원 건설환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Chonnam National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

사면의 안정성을 장기간 확인하기 위해서는 그라운드 앵커의 긴장력을 측정하는 것이 매우 중요하다. 그러나 현재 현장에서 주로 사용되는 스트레인게이지 및 V/W타입의 로드 셀은 전자기파에 의한 노이즈 발생이 크고 습기 또는 수분의 영향으로 인해 측정값에 오차가 발생할 수 있으며 자기열화 등으로 장기간의 모니터링에 한계가 있다. 또한 앵커의 개별 텐던에 발생하는 미세한 변화를 정확히 감지할 수 없는 단점이 있어 이를 개선할 수 있는 방안으로 광섬유 센서를 이용하여 강연선의 변형률을 측정할 수 있는 광섬유 센서 내장형 텐던이 개발되었다. 이 광섬유 센서 내장형 텐던은 단기간의 앵커 장력 측정에 성공적으로 적용된 사례가 보고되었으나 장기간에 걸친 장력 변화를 측정하기 위해서는 온도에 의한 광섬유 센서의 변형률을 보정하여야 한다. 이 논문에서는 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용하여 그라운드 앵커의 장력모니터링 시 지중온도 변화에 의한 영향을 보정하는 실용적인 방안에 대하여 기술하였다. 먼저 실내실험을 통하여 광섬유 센서 내장형 텐던의 온도반응계수( $\beta'$ )를  $2.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 로 결정하고 실제 현장에 설치된 광섬유 센서를 이용하여 깊이별 지중온도 변화값을 측정하였다. 연구 대상지역(여수)의 기상청 지중온도 측정결과와 자료와의 비교를 통하여 결정된 온도반응계수( $\beta'$ )를 이용한 광섬유 센서 내장형 텐던의 온도반응 성능을 검증하였다. 최종적으로 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용하여 실제 사면에 설치된 인장형 앵커와 압축형 앵커의 계절별 긴장력을 모니터링하고 기상청 지중온도 측정자료와 온도반응계수를 이용하여 온도보상을 실시하여 기존 V/W타입의 로드 셀 측정 결과와 비교하였다. 제안된 광섬유 센서 내장형 텐던의 온도반응계수와 기상청 지중온도 측정결과를 이용한 앵커의 온도보상 방법에 의해 측정된 긴장력 모니터링 결과가 계절에 따른 지중온도 변화에 상관없이 로드 셀 결과와 일관성 있게 비교되어 제안된 온도보상 방법이 매우 실용적이며 합리적인 것으로 나타났다.

**Keywords :** FBG sensor, Ground anchor, Optical FBG Sensors Embedded Tendon, Temperature compensation

## 1. 서 론

7연-강연선은 쏘일앵커 및 락앵커와 같은 지반보강재에 많이 적용되고 있음에도 불구하고 현재까지는 개별 강연선의 장력을 직접 측정하는 정확하고 간단한 방법이 거의 없다. 또한 흙막이 굴착 및 절취사면의 보강공법으로 많이 적용되고 있는 그라운드 앵커의 장력을 측정하는 전기저항식 로드 셀과 스트레인게이지 타입의 현재 모니터링 방법은 앵커를 구성하는 다수의 강연선의 전체적인 장력만을 측정할 수 있고 전기저항식 센서의 경우 자기열화에 의하여 장기적인 적용에 어려움이 있으므로 안전관리를 위한 장기적인 모니터링 적용에 한계가 있다. 이에 이를 개선할 수 있는 방안으로 광섬유 센서를 이용하여 강연선의 변형률을 측정할 수 있는 광섬유 센서 내장형 텐던이 개발되었다(Kim 등, 2007). 앵커를 구성하는 7연 강연선(텐던)의 중앙케이블에 삽입된 광섬유브래그격자(Fiber Bragg Grating; FBG)센서는 기존 스트레인게이지 타입에 비해 크기가 작고 내구성이 우수하며 전자기파에 의한 노이즈 발생이 없고 하나의 선으로 다중점 측정(multiplexing)이 가능하여 장기모니터링에 효과적인 장점이 있다. Kim 등(2009b)과 Sung 등(2011)은 광섬유 센서 내장형 텐던을 인장형 앵커의 정착장 하중전이 특성 및 단기간의 장력측정에 성

공적으로 적용한 바 있다. 그러나 광섬유 센서는 변형률 뿐 아니라 온도에 대해서도 반응하므로 장기간의 장력 변화를 모니터링하기 위해서는 온도변화에 대한 보상이 이루어져야만 한다. 그러나 기존의 FBG센서 온도보상에 대한 연구결과들을 이용하기 위해서는 추가적인 광섬유 센서의 도입이 요구되므로 센서 개수가 증가하여 경제적이지 못하며 센서단위의 온도보상 효과는 확실하지만 제작 자체의 어려움이 있어 현실적으로 적용하기 어렵다.

이에 본 연구에서는 광섬유 센서 내장형 텐던을 그라운드 앵커의 장기모니터링에 적용할 수 있도록 광섬유 센서 내장형 텐던의 온도반응계수와 기상청의 지중온도 측정결과를 이용하여 광섬유 센서 내장형 텐던으로 실제 현장에 설치된 앵커에 대한 장기간의 모니터링 결과를 온도 보정하는 경제적인 방안에 대해 기술하였다. 먼저 실내 실험을 통해 광섬유 센서 내장형 텐던의 온도반응계수( $\beta'$ )를 결정하였다. 결정된 온도반응계수( $\beta'$ )를 이용하여 현장에 설치된 광섬유 센서 내장형 텐던의 깊이 방향으로 배치된 광섬유 센서 위치에서 지중온도를 측정하고 기상청에서 지중온도계로 측정한 지중온도 변화(기상청: [www.kma.go.kr](http://www.kma.go.kr))와 비교하여 온도반응계수( $\beta'$ )의 적용성을 검증하였다. 한편 광섬유 센서 내장형 텐던으로 구성된 11.2m 길이의 인장형 앵커 및 10.5m 길이의 압축형 앵커를 제작하여 파쇄가 심한 연암내지

풍화암의 실제 절취사면에 각각 시공하고 앵커 두부에서 초기 긴장력을 도입한 후 계절별 장력모니터링을 1년 이상 수행하였다. 1년 이상 측정된 긴장력에 대해 온도보상을 실시하고 앵커의 두부에 설치된 V/W 로드셀의 긴장력 측정결과와 비교하였다.

## 2. 그라운드 앵커의 장력측정 사례 및 광섬유 센서의 온도보상 연구

그라운드 앵커는 가해진 긴장력에 의해 굴착면 및 사면의 안정성을 유지하는 지반 보강재이므로 초기에 도입된 긴장력이 정확히 가해지고 설계기간 또는 구조물의 수명동안 유지되는 것이 매우 중요하므로 이에 대한 확인이 주기적으로 이루어져야 한다. 그러나 사용중 앵커의 긴장력 측정은 Lift-off법에 의해 긴장력 풀림을 측정하고 있는 것이 일반적인 현실이며 계측목적으로 앵커두부(head)에 전기저항식이나 V/W 타입의 로드 셀을 설치하는 경우도 있다.

그라운드 앵커의 장력 측정을 위한 로드 셀 적용에 대한 국내 연구사례[Chun 등(1993), Yhim and Lee(1999), Hong 등(2004), Huh 등(2010)]들은 보강 후 붕괴사고 발생 시 로드 셀이 앵커 축력의 급격한 변화를 감지하지 못하거나 긴장력 도입 시 유압 잭과 로드 셀에서 서로 다른 긴장력 손실이 발생하는 등 앵커의 긴장력 관리를 위한 추가적인 시스템의 개발이 필요한 것으로 나타났다. 또한 알려진 바와 같이 전기저항식 로드 셀은 앵커두부 보호캡의 파손 및 낙하에 의해 노출될 경우 녹이나 부식, 자기열화 등에 의해 특별한 경우를 제외하면 불과 수년 이상의 수명을 기대할 수 없으며 영구사면과 같이 장기적인 관리가 필요한 경우에는 적용에 한계가 있다.

Moerman 등(2005)은 V/W타입의 기존 로드 셀 표면에 전기저항식 스트레인지지 대신에 FBG센서를 부착하여 특수한 로드 셀을 제작하고 재하실험을 통해 그라운드 앵커의 장력을 성공적으로 측정하였다. Chang 등(2003)은 락볼트 보강사면의 거동을 측정하기 위해 락볼트 표면에 FBG센서를 부착하여 변형률을 측정하였다. 이때 FBG센서의 계측값에 포함된 지중온도의 영향을 보정하기 위해 같은 위치에 설치된 FBG센서의 변형률 값에서 V/W 변형률계의 변형률 값을 빼준 값이 온도에 의한 영향으로 보고 실내실험에서 나온 보정치로 환산하여 온도보상을 수행하였다. 최근 Kim 등(2011)은 그라운드 앵커의 단기 현장인발실험 중 광섬유 센서 내장형 텐던에서 측정된 긴장력과 앵커두부에 설치된

로드 셀에서 측정된 긴장력을 비교하였다. 실험결과 FBG센서를 이용한 그라운드 앵커의 단기 장력 측정에는 온도보상에 대한 특별한 고려 없이도 로드 셀과 같은 정도의 측정값을 얻을 수 있음을 보였다. 이러한 연구들을 통해 광섬유 센서가 로드 셀과 유사한 정확도를 가지면서도 보다 내구성 있는 센서로서 활용이 가능할 것으로 예상되나 장기간 동안의 측정을 위해서는 광섬유 센서에 포함되는 온도효과를 효과적으로 제거하기 위한 연구가 반드시 필요하다. James 등(1996)은 서로 다른 굵기를 갖는 광섬유 내에 삽입된 광섬유 격자를 이용하여 광섬유의 온도와 변형률 반응을 분리하였으며 Jung 등(1999)은 에르븀첨가 광섬유 증폭기(EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier)를 이용하여 단일 FBG센서로부터 변형률과 온도변화를 동시에 측정하는 기술을 제안하였다. Iwashima 등(1997)과 Haran 등(1998)은 FBG센서의 온도보상을 위해 FBG센서들을 포장하는 기술을 제안하였으며 Zhou and Ou(2004)와 Jung(2005)은 스틸튜브와 유리관으로 각각 센서를 보호하여 온도만을 감지한 FBG를 이용하여 보상하였다. 한편 Kim 등(2009a)은 마이크로 콘의 선단저항력 측정을 위해 선단저항부에 2개의 FBG센서와 온도변화에 의한 파장변화를 측정하기 위한 온도보상용 FBG센서까지 3개의 FBG센서를 배치하고 콘이 지중에 관입될 때 관입저항력에 의해 측정된 광섬유 파장변화량 식에서 주변 온도에서만 반응한 온도센서의 파장 변화량 식을 차감하여 순수하게 지중에 관입되는 저항력에 의해 획득한 변형률 값을 구한 바 있다.

그러나 이러한 센서단위의 온도보상 방법은 매우 정교하기는 하지만 제작이 어렵고 하나의 FBG센서만으로는 온도와 하중으로 인한 변형률을 분리할 수 없어 필요한 센서와 계측기의 수가 증가하여 경제적이지 못한 단점을 안고 있다. 본 연구의 대상인 그라운드 앵커는 지중에 설치되는 지반 보강용 구조물로 설치 깊이에 따라 대기온도의 영향이 매우 적은 편이므로 경제적이면서도 합리적인 온도보상 기법의 개발이 매우 필요하다.

## 3. 광섬유 센서를 이용한 7연 강연선의 변형률 측정 원리 및 온도반응계수 결정

### 3.1 FBG센서의 변형률 측정원리

Figure 1은 FBG센서의 구조 및 측정원리를 나타낸다. 광대역 광 스펙트럼(incoming light)을 광섬유에 입사

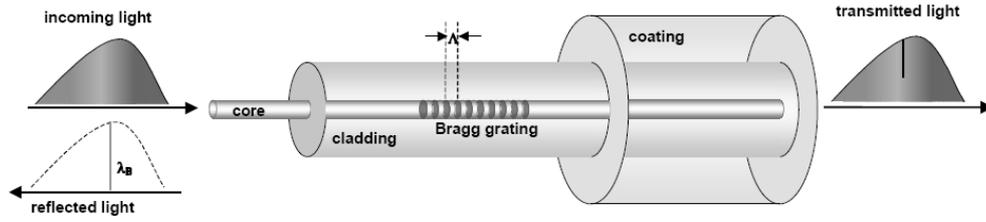


Fig. 1. Principles of FBG sensor measurement

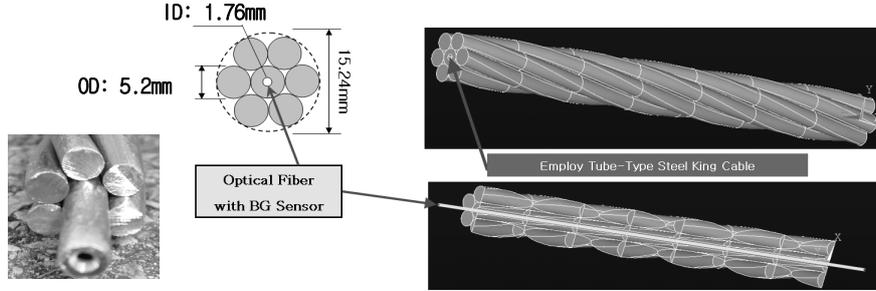


Fig. 2. Concept of FBG sensors embedded tendon and its cross section

시킬 경우 브래그 조건식( $\lambda_B = 2n\Lambda$ ,  $n$ =광섬유의 굴절률,  $\Lambda$ =Bragg격자의 간격)에 만족하는 파장 성분( $\lambda_B$ )만이 광섬유 격자에서 반사(reflected light)되며 나머지 파장 성분은 그대로 통과(transmitted light)하여 광 스펙트럼 분석기(interrogator)에 나타난다. 만일 FBG에 온도나 압력 등의 외부 물리량이 가해질 경우 브래그의 간격( $\Lambda$ )이 변화하여 결국 반사되는 파장( $\lambda_B$ )에 변화가 발생하게 된다. 그러므로 브래그 파장의 변화( $\Delta\lambda_B$ )를 측정한다면 FBG에 가해진 물리량의 변화를 측정할 수 있다. 이때 온도와 변형률 변화에 대한 브래그 반사파장의 변화량( $\Delta\lambda_B$ )은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Hill and Meltz, 1997).

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(1-P_e)\Delta\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T] \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ 는 온도 팽창계수(실리카:  $0.51 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ),  $\xi$ 는 열 광학계수( $5.76 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ),  $P_e$ 는 광탄성 상수(0.22),  $\Delta\varepsilon$ 은 광섬유 격자의 변형률 변화량,  $\Delta T$ 는 광섬유 격자의 온도 변화량이다. 이때 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용하여 단기간에 현장인발실험을 통해 그라운드 앵커의 장력을 측정하는 경우에는 온도변화에 대한 브래그 반사파장의 변화량을 무시하면( $\Delta T=0$ ), 식 (1)은 다음 식 (2)와 같이 반사파장의 변화량( $\Delta\lambda_B$ )으로부터 변형률의 변화량( $\Delta\varepsilon$ )을 알 수 있도록 정리할 수 있다(Kim 등, 2011).

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{(1-P_e)} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (2)$$

그러나 사계절과 같이 장기간에 걸쳐 그라운드 앵커의 장력을 측정하는 경우에는 설치된 센서의 위치에 따라서 계절별 온도변화에 대한 브래그 반사파장의 변화량을 반드시 고려해야 하므로 식 (1)은 광섬유 센서의 온도반응계수( $\beta = \alpha + \xi$ )를 포함하여 식 (3)과 같이 정리할 수 있다. 이때 우변 2항은 온도변화에 의한 변형률 보정항이다.

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \frac{1}{(1-P_e)} - \frac{\beta\Delta T}{(1-P_e)} \quad (3)$$

한편 일정 간격의 Bragg를 갖는 광섬유 센서가 내장된 광섬유 센서 내장형 텐던의 구조는 Figure 2와 같다. 강연선의 중앙 킹케이블을 중공 강제튜브( $\phi 5.2\text{mm}$ )로 교체한 후 튜브 내부에 광섬유 센서를 삽입하고 접착제(폴리에스터레진+경화제)를 주입하여 케이블과 일체가 되도록 한다(Kim 등, 2007). Kim 등(2007)과 Kim 등(2008)은 FBG센서가 삽입되어 접착제로 접착되어 있는 중공 강제튜브에 대한 성능실험을 통해 FBG센서의 중공 강제튜브와 일체화 및 센서로서의 기능을 검증하였다. 한편, 광섬유 센서의 특성상 다중점 측정이 가능하므로 원하는 위치에서 Bragg센서의 변화를 측정하면 앵커의 장력뿐 아니라 앵커의 하중전이 측정도 가능하다(Kim 등, 2009b).

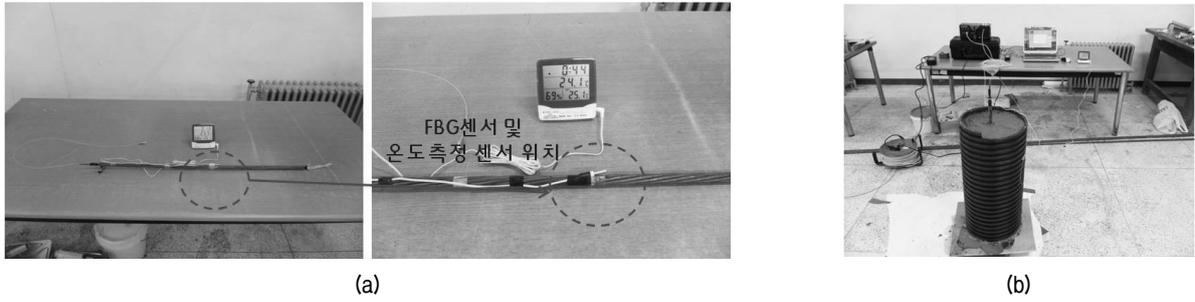


Fig. 3. Laboratory test for measuring temperature sensitivity coefficient of FBG sensors embedded tendon

### 3.2 광섬유 센서 내장형 텐던의 온도반응계수

광섬유 센서 내장형 텐던을 이용하여 그라운드 앵커의 계절별 장력 모니터링 시 광섬유 센서가 위치한 2.0m ~ 2.5m 깊이에서는 계절에 따라 지중온도의 변화가 크므로 영향을 무시할 수 없다. 따라서 식 (3)의 우변 2항과 같이 광섬유 센서의 반사파장의 변화량( $\Delta\lambda_B$ )에 따른 변형률 변화량( $\Delta\epsilon$ )은 계절별 지중온도 변화( $\Delta T$ )에 대하여 반드시 보상하여야 한다. 이 때, 식 (3)에 나타난 온도 반응계수  $\beta$ 는 광섬유만의 값이며 본 연구에서 이용하는 광섬유 센서는 중공 강연선 내부에 특수레진으로 접착된 구조이므로 이 구조 전체의 온도반응계수( $\beta'$ )를 도출할 필요가 있다. 이에 광섬유 센서 내장형 텐던의 온도보상을 위한 온도반응실험은 Figure 3과 같이 실시하였다. 먼저 Figure 3(a)과 같이 광섬유 센서 내장형 텐던 시편(L=0.8m)의 중간에 광섬유 센서 및 온도측정용 센서를 배치하고 Figure 3(b)와 같이 제작된 콘크리트 모형압반에 텐던 시편을 설치하여 콘크리트 경화 시 발열 온도변화( $\Delta T$ )와 반사파장 변화량( $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ )관계를 검토하였다.

콘크리트 모형압반에서 광섬유 센서 내장형 텐던 시편(L=0.8m)의 온도반응실험 결과 콘크리트의 발열온도 변화( $\Delta T$ )와 광섬유 센서의 반사파장 변화량( $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ )은 Figure 4와 같이 선형관계로 나타낼 수 있어 온도반응계수( $\beta'$ )를  $2.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 로 결정하였다.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \beta' \cdot \Delta T \quad (4)$$

여기서,  $\beta'$ 는 광섬유 센서 내장형 텐던의 온도반응계수이다.

한편 Moerman 등(2005)은 V/W타입의 기존 로드 셀 표면에 FBG센서를 부착하여 제작된 특수한 로드 셀을

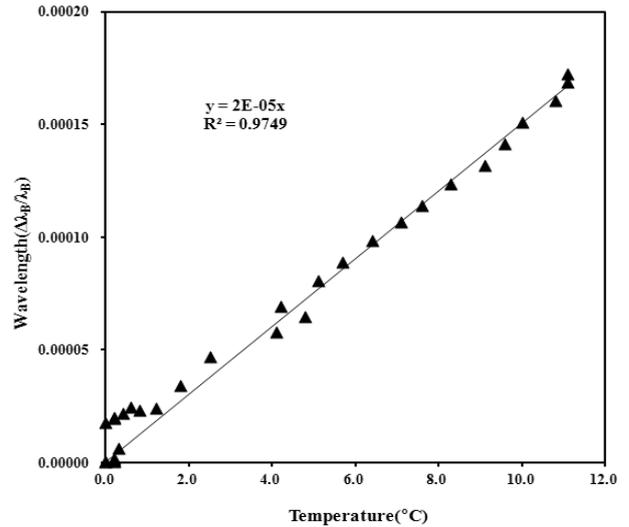


Fig. 4. Test result for temperature sensitivity coefficient of FBG sensor embedded tendon

이용하여 그라운드 앵커 장력모니터링을 수행하였고 이때 적용한 FBG센서의 온도반응계수( $\beta^*$ )는 식 (5)와 같이 정리된다.

$$\beta^* = \beta + (1 - P_c)(\alpha_h - \alpha_f) \quad (5)$$

여기서,  $\beta^*$ 는 로드 셀 금속표면에 부착된 FBG센서의 온도반응계수( $\beta^* = 1.45 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ),  $\beta$ 는 FBG센서의 온도반응계수( $\beta = 6.31 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ),  $\alpha_h$ 는 로드 셀 금속표면에 부착된 FBG센서의 온도팽창계수( $\alpha_h = 11 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ),  $\alpha_f$ 는 FBG센서의 온도팽창계수( $\alpha_f = 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )이다.

온도반응실험 결과 추정된 광섬유 센서 내장형 텐던의 지중온도 변화에 대한 온도반응계수( $\beta'$ )는 Moerman 등(2005)이 대기 중의 로드 셀 금속표면에 부착한 FBG센서에 적용한 온도반응계수( $\beta^*$ )보다 약간 큰 값을 나타내는 것으로 나타났다.

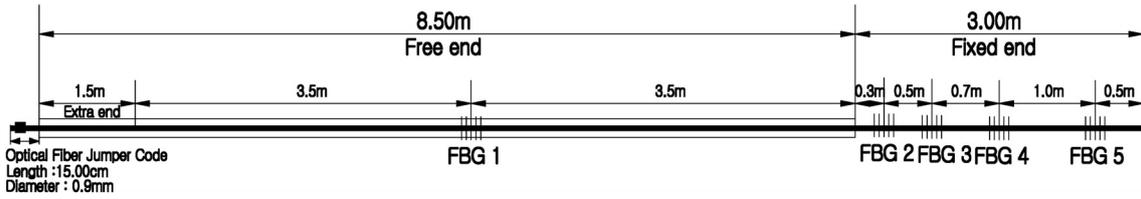


Fig. 5. FBG sensor array for measuring ground temperature profile

### 3.3 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용한 지중온도 변화 측정 검증

실내실험에서 결정한 광섬유 센서 내장 텐던의 온도 반응계수( $\beta$ )를 검증하기 위해 실제 현장에 광섬유 센서 내장형 텐던을 설치하고 다양한 깊이에서 광섬유 센서의 반사파장 변화량으로부터 지중온도 변화( $\Delta T$ )를 측정하였다. 이 때 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용하여 지중에서 깊이에 따른 온도변화( $\Delta T$ )를 측정하기 위해 Figure 5와 같이 자유장 및 정착장부에 FBG센서를 배치하고 Figure 6과 같이 지중에 매설한 후 재하하지 않는 상태( $\Delta \epsilon = 0, \Delta T \neq 0$ )로 시간경과에 따라 반사파장의 변화량을 측정하였다. 그 후 실내실험에서 결정한 온도반응계수  $\beta$ 를 식 (4)에 대입하여 브래그 반사파장의 변화량 ( $\Delta \lambda_B / \lambda_B$ ) 관계식으로부터 지중온도 변화( $\Delta T$ )를 산정할 수 있다. 비교검증 자료로 기상청이 연구 대상현장 지역 (여수)에 설치하여 운영하고 있는 지중온도계 측정결과를 이용하였다.

2011년 6월 16일에서 2011년 7월 26일까지 약 40일 동안 Figure 6과 같이 지중에 별도로 매설한 광섬유 센서 내장형 텐던에서 반사파장 변화량( $\lambda_B / \Delta \lambda_B$ )을 측정하여 온도반응계수  $\beta$ 로부터 지중온도 변화( $\Delta T$ )를 측정한 결과는 Figure 7과 같다.

광섬유 센서 내장형 텐던의 자유장(GL-3.5m)에 위치한 광섬유 센서(FBG1)는 대기온도 변화(-1.2~4.5°C)에 따라 3.0°C 정도 범위의 지중온도 변화가 나타났으나 정착장(GL-7.0m이하)에 설치된 광섬유 센서들(FBG2, 3, 4, 5)은 1.0°C이내 범위의 지중온도 변화가 있는 것으로 측정되었다. 심도 GL-3.5m의 자유장에 설치된 FBG1의 지중온도 변화와 심도 GL-3.0m에서 기상청 지중온도계에서 측정된 지중온도 변화 데이터의 비교 결과를 Figure 8에 나타냈다. FBG1(GL-3.5m)의 지중온도 변화는 0.0~2.7°C범위로 나타났고 기상청 지중온도 데이터(GL-3.0m)는 0.0~2.5°C범위로 나타났다. 지중온도 측정결과가 동일한 깊이와 동일장소가 아님에도 불



Fig. 6. Verification test setup for measuring ground temperature profile by FBG sensors

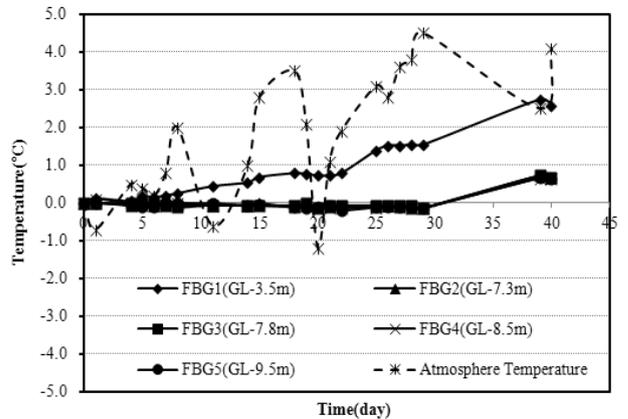


Fig. 7. Variation of ground temperature profiles measured by FBG sensors from the verification test

구하고 그림에 나타난 바와 같이 거의 일치하는 결과를 나타내 실내 온도보상 실험에서 결정한 텐던 내장 광섬유 센서의 온도반응계수( $\beta$ )는 그라운드 앵커의 장기모니터링 시 지중온도 변화 측정에 적용 가능성을 검증하였다. 또한 이 온도반응계수를 바탕으로 해당 지역의 기상청 지중온도 측정결과가 유사한 깊이에 존재하는 경우 식 (4)와 (3)을 이용하여 광섬유 센서 내장형 텐던의 지중온도 변화에 의한 변형률 산정 및 보상에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

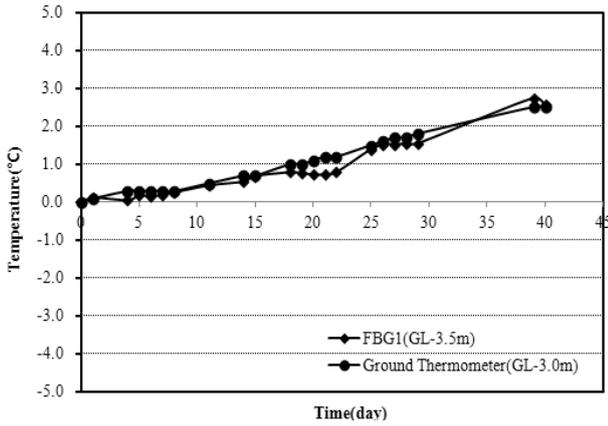


Fig. 8. Comparison of ground temperature between measured by thermometer and predicted by FBG sensor (GL-3.0~-3.5m)

#### 4. 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용한 그라운드 앵커 긴장력의 계절별 모니터링 및 온도보상

##### 4.1 인장형 앵커와 압축형 앵커

그라운드 앵커는 하중을 지지하는 방식에 따라 인장형 앵커와 압축형 앵커로 구분할 수 있다. Figure 9(a)의 인장형 앵커는 선단부에 강선과 그라우트를 부착시킨 정착장(fixed length)과 쉬스관을 사용하여 그라우트와 강선을 접착시키지 않은 자유장(free length)으로 구분되

고 앵커두부에서 가해진 하중은 정착장을 통해 주변 그라우트와 지반으로 전달된다. 최근에 많이 사용되는 압축형 앵커는 Figure 9(b)와 같이 앵커 선단에 강선을 고정하는 선단 재하판(bearing member)을 이용하고 앵커 강선에 쉬스관을 둘러싸아 강연선과 그라우트가 부착되지 않게 하여 앵커 전장에 자유장을 형성하고 앵커두부에서 가해진 하중이 직접 앵커 선단의 재하판에 가해질 수 있도록 한다. 앵커 선단에서 재하판에 가해진 하중은 앵커를 둘러싼 그라우트에 압축력을 발생하여 앵커하중을 지지한다. 따라서 압축형 앵커는 인장형 앵커에서 발생하는 인장균열 등이 없으며 강선이 쉬스관에 싸여 있으므로 부식을 방지할 수 있어 영구앵커로 사용되는 경우가 많다. 또한 Figure 9(c)의 압축형 하중분산 앵커는 여러 개의 내하체에 하중을 분산시켜 그라우트 강도에 영향이 적으며 각각의 내하체를 중심으로 응력구근이 형성되어 앵커두부에서 가해진 하중이 주변 지반에 고르게 전달됨으로써 파쇄대나 연약한 지반 및 토사지반에서도 암반에서와 같은 지지력을 발휘한다.

절취사면에 시공된 그라운드 앵커의 초기에 도입된 긴장력 및 유지관리 시 긴장력 변화량을 측정하기 위해 Figure 10과 같이 인장형 앵커의 자유장 및 압축형 하중분산 앵커의 선단 재하판 부근에 FBG센서를 배치하였으며 센서의 초기 반사파장이 Table 1에 정리되어 있다.

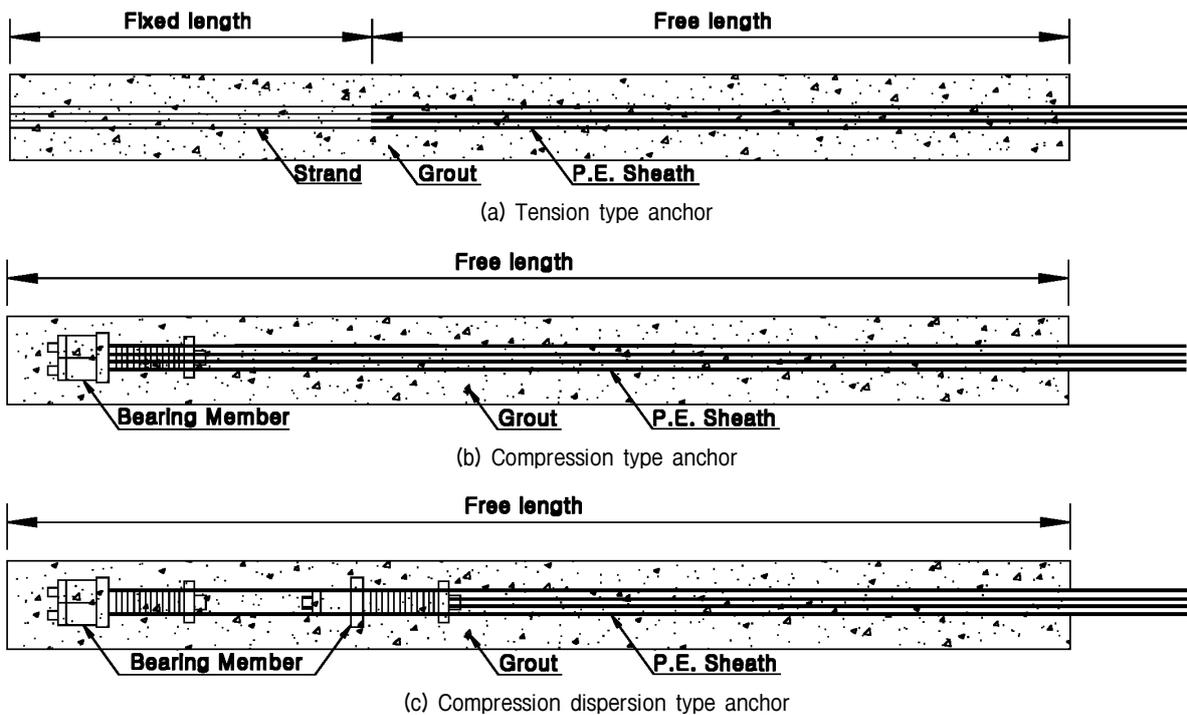


Fig. 9. Various types of ground anchor

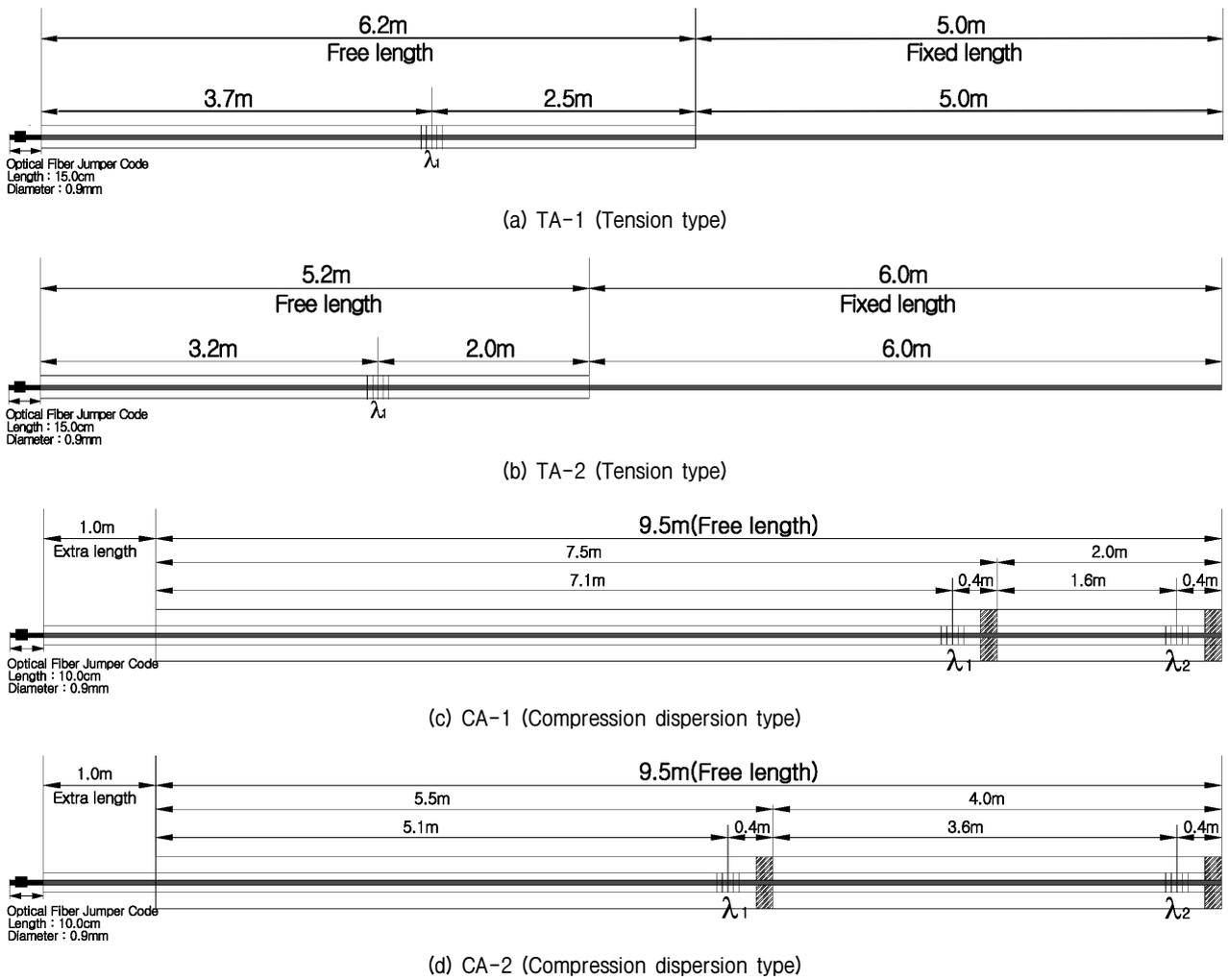


Fig. 10. Arrangement of FBG sensors and design of ground anchors

Table 1. Initial wavelength and location of FBG Sensors arranged in ground anchor

No.	Initial Wavelength ( $\lambda_B$ ) (nm)		Location of FBG sensor GL(-)m	FBG sensor dimension		Anchor Type
	$\lambda_1$	$\lambda_2$		Length (mm)	Diameter (mm)	
TA-1	$\lambda_1$	1528.0280	2.5	20	0.125	Tension
TA-2	$\lambda_1$	1552.0854	2.0			
CA-1	$\lambda_1$	1549.8637	7.1			
	$\lambda_2$	1547.7299	9.1			
CA-2	$\lambda_1$	1555.9498	5.1			
	$\lambda_2$	1557.7804	9.1			

인장형 앵커(TA-1, TA-2)의 자유장에는 앵커 두부에 가해진 긴장력이 마찰없이 전달되므로 초기 긴장력을 도입한 후 FBG센서에서 측정된 반사파장의 변화로부터 변형률 변화량을 환산하여 앵커의 초기 긴장력 및 변화량을 간단히 산정할 수 있고 압축형 하중분산 앵커(CA-1, CA-2)는 각각의 선단 재하판 부근에서 측정된 초기 긴장력 및 변화량을 산정하여 여러 개의 내하체에서 하중분산 효과까지 직접 확인할 수 있다.

#### 4.2 변형률 측정이 가능한 그라운드 앵커의 현장시공 및 장력모니터링

그라운드 앵커의 계절별 장력모니터링을 위해 Figure 11과 같이 전남대학교 해안항만 실험센터 배후 절취사면에 변형률 측정이 가능한 인장형 앵커 2개 및 압축형 하중분산 앵커 2개를 각각 시공하였다. 그라운드 앵커로 보강된 사면의 지반조건은 파쇄가 심한 연암내지 풍

Table 2. Dimension of ground anchor and ground condition of fixed length

No.	Anchor length (m)	Boring length (m)	Free length (m)	Fixed length (m)	Boring diameter (mm)	Number of tendon (n)	Ground Condition
TA-1	11.2	10.0	6.2	5.0	105	4	Soft Rock
TA-2			5.2	6.0	105	4	
CA-1	10.5	9.5	10.5	-	105	4	Weathered Rock ~ Soft Rock
CA-2			10.5	-	105	4	



(a) Initial jacking of anchor



(b) Load cell measurement



(c) FBG sensor measurement

Fig. 11. Field test for seasonal tension force monitoring of ground anchor

화암으로 구성되어 있으며 앵커길이, 설계조건 및 사면 지반조건은 Table 2에 정리되어 있다.

#### 4.3 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용한 그라운드 앵커 긴장력의 계절별 모니터링 결과

1. 인장형 앵커에서 계절별 장력모니터링은 Figure 12와 같이 기존의 V/W타입 로드 셀과 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용하여 수행하였고 압축형 하중분산 앵커에서는 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용하여 각각의 내하체에 도입된 긴장력의 계절별 변화를 측정하였다. 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용한 그라운드 앵커 긴장력의 계절별 모니터링 결과는 Figure 13 및 Figure 14와 같다.

Figure 13(a) TA-1에서 초기 긴장력 도입 시(2010년 9월 17일) 광섬유 센서 내장형 텐던 및 V/W 로드 셀을 이용하여 측정한 그라운드 앵커의 긴장력 값은 각각 215.96kN 및 201.24kN이다. V/W타입의 로드 셀은 실내에서 보정한 초기 읽음값을 기준으로 긴장력을 측정하였고 광섬유 센서 내장형 텐던은 현장에서 앵커를 정착한 시점의 초기 반사파장 읽음값을 기준으로 긴장력을 측정하였다. TA-1에서 계절별 장력모니터링을 수행하는 동안 같은 시기에 여수지역에서 측정된 기상청 자료에 의하면 대기온도 변화( $\Delta T$ )는  $-2.2 \sim 24.2^\circ\text{C}$  범위에서 발생하였고 G.L-2.0m에서 지중온도 변화( $\Delta T$ )는  $12.4 \sim$

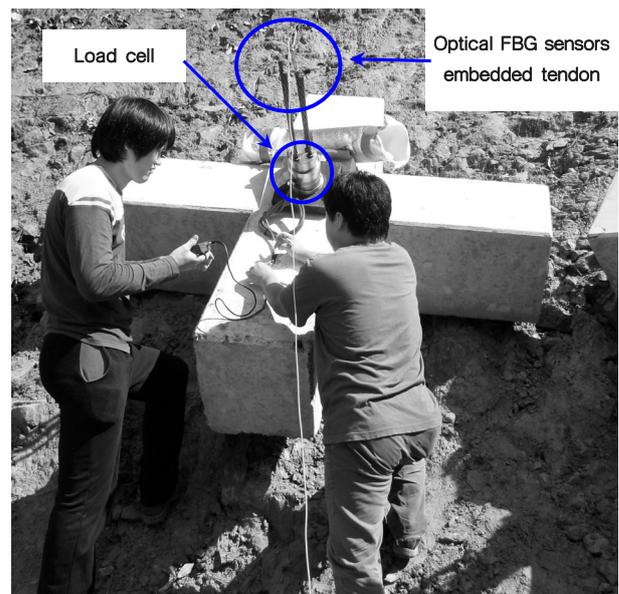


Fig. 12. Tension force monitoring by using load cell & Optical FBG sensor

$20.6^\circ\text{C}$  범위로 발생한 것으로 조사되었다. 지중온도 변화( $\Delta T$ )가 대기온도 변화( $\Delta T$ )에 비해 상대적으로 작은 범위의 온도변화를 나타내지만 무시할 수 없는 정도이므로( $\Delta T \neq 0$ ) 본 연구에서 측정된 온도반응계수  $\beta'$ 와 식 (3)을 이용하여 광섬유 센서 내장형 텐던의 측정값으로부터 지중온도 변화에 의한 변형률을 제거하는 보상을 실시하고 같은 그림에 도시하였다. 온도보상 전 광섬유 센서 내장형 텐던의 긴장력 값은 지중온도 변화와

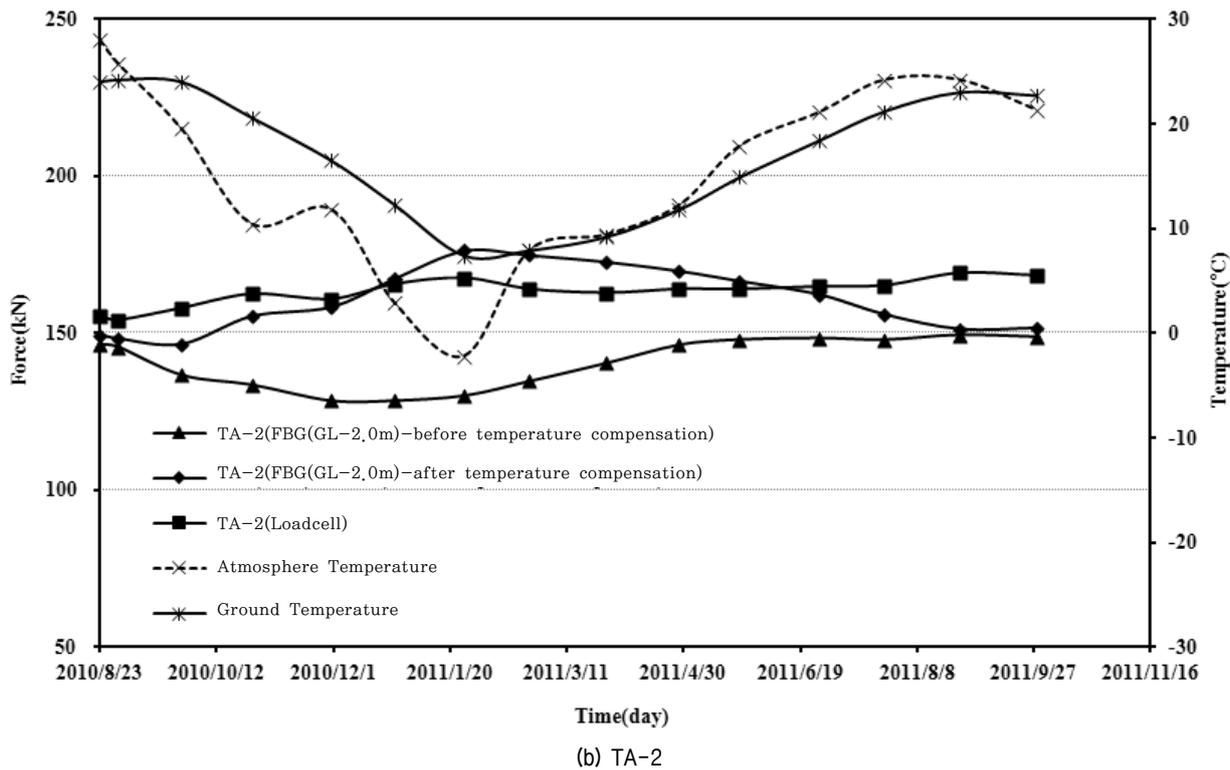
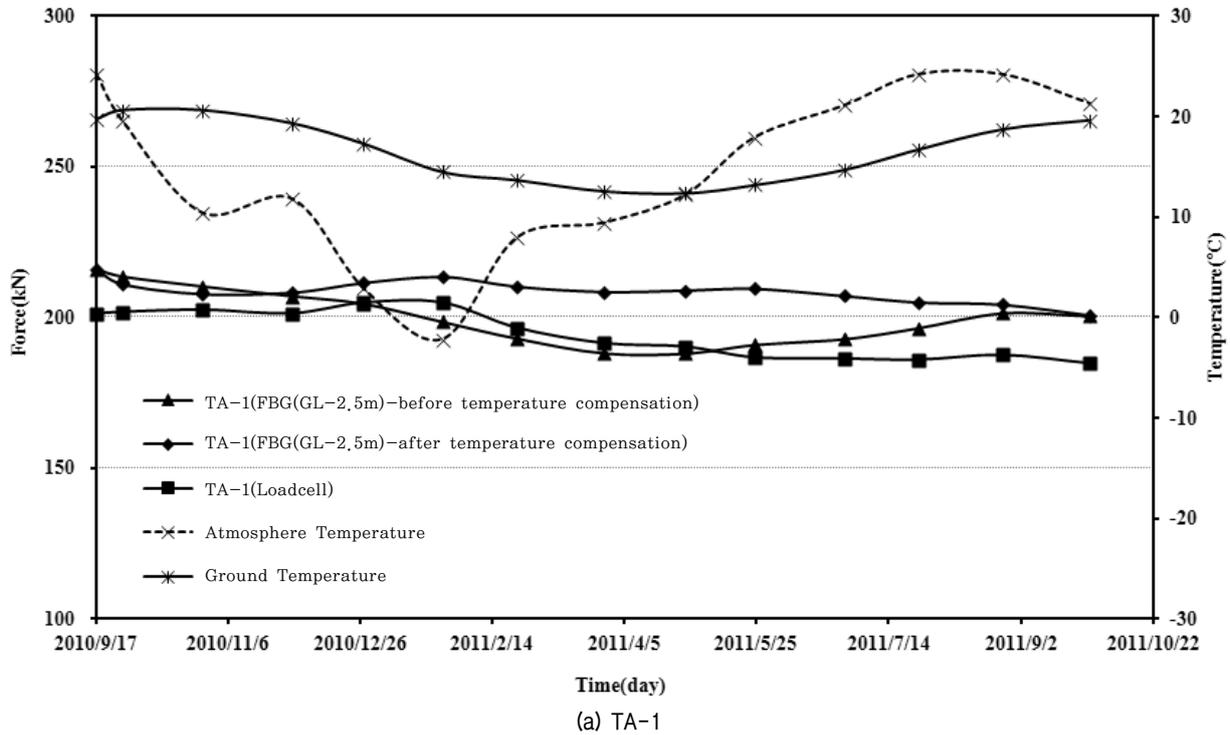


Fig. 13. Comparison of seasonal tension force before and after temperature compensation (Tension type anchor)

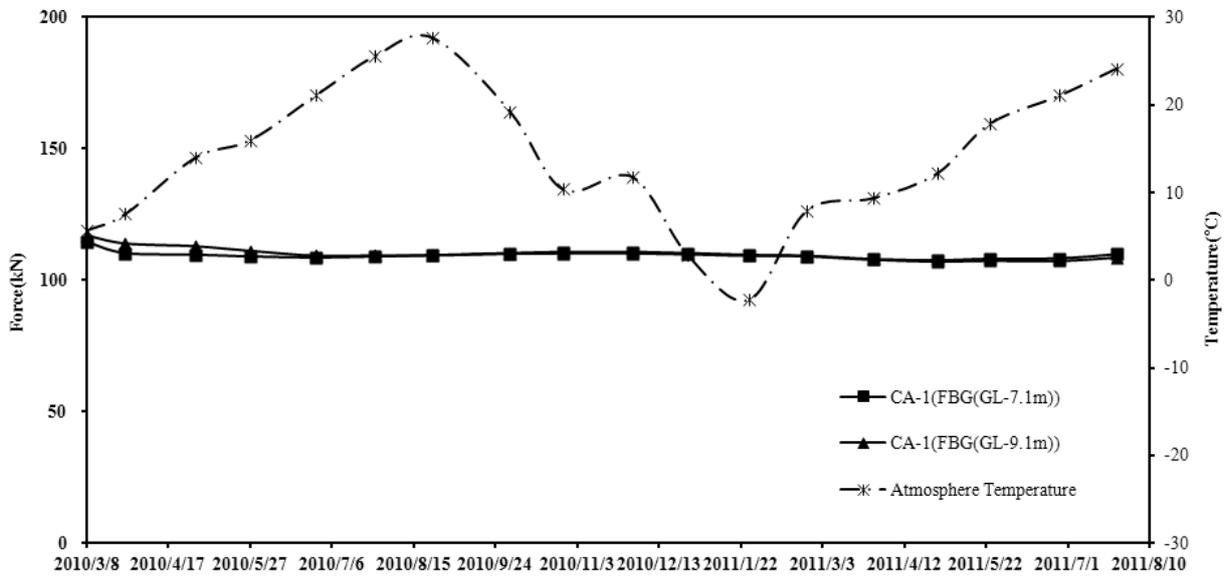
유사하게 계절변화에 따라 증가와 감소를 반복하여 지중온도의 영향을 직접적으로 받고 있음을 알 수 있다. 그러나 지중온도 변화( $\Delta T$ )에 의한 영향을 보정한 온도 보상 후 광섬유 센서 내장형 텐던 긴장력 값은 초기 긴

장력 도입 후 지중온도 변화와 큰 상관없이 로드 셀과 같이 일관성 있는 결과를 나타내고 있다. 한편 광섬유 센서 내장형 텐던 및 로드 셀에서 1년 동안 측정된 긴장력 손실량은 각각 7.1%와 8.2%로 나타났다. Figure 13(b)

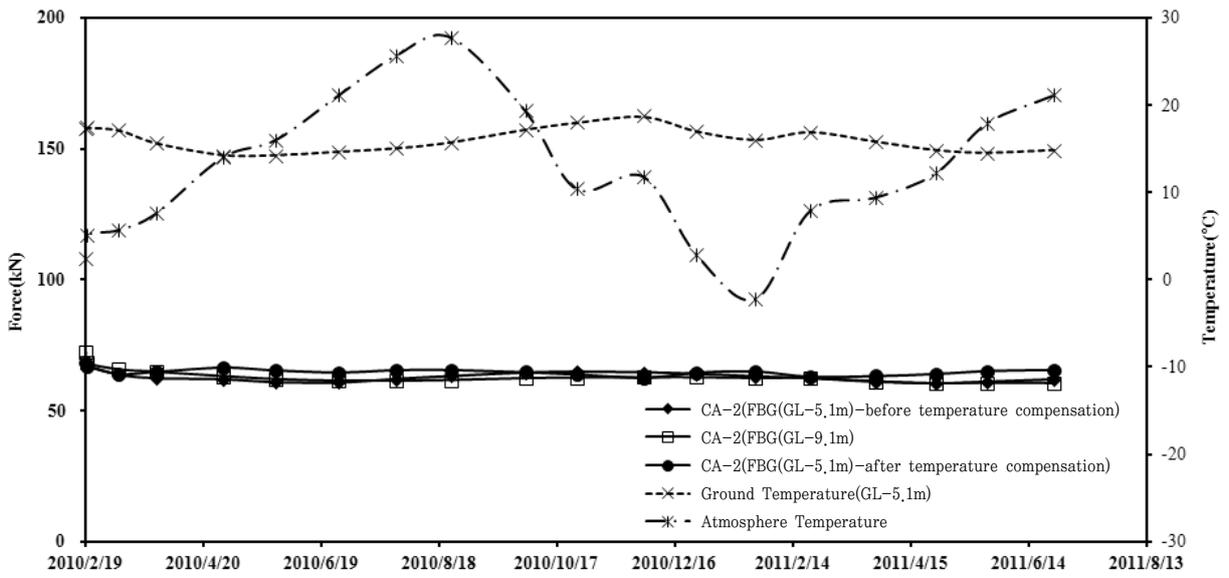
TA-2에서 초기 긴장력 도입 시(2010년 8월 23일) 광섬유 센서 내장형 텐던 및 V/W 로드 셀을 이용하여 측정된 그라운드 앵커의 긴장력값은 각각 149.37kN 및 155.39kN이다. TA-2에서 계절별 장력모니터링을 수행하는 동안 여수지역에서 측정된 기상청 자료에 의하면 -2.2~28.0°C 범위의 대기온도 변화( $\Delta T$ )가 발생하였고 GL-2.0m깊이의 지중온도 변화( $\Delta T$ )는 7.4~24.2°C 범위로 발생하였다. TA-1의 경우와 같이 기상청 지중온도 자료와 온도보상계수에 의해 지중온도 변화( $\Delta T$ )의 영향을 보정한

광섬유 센서 내장형 텐던 긴장력 값은 초기 긴장력 도입 이후 지중온도 변화에 반응하지 않고 로드 셀과 유사하게 일관성 있는 경향을 나타내 본 연구에서 결정한 온도보상계수와 광섬유 센서 내장형 텐던의 온도보상방법이 효과적임을 알 수 있다.

본 연구에서 적용된 압축형 앵커(CA-1, CA-2)는 선단 재하부에 집중된 하중을 2개소의 내하체로 분산시키는 형식의 압축형 하중분산 앵커이다. Figure 14(a)에 나타난 바와 같이 CA-1에는 초기 긴장력 도입 시(2010년 3월 8



(a) CA-1



(b) CA-2

Fig. 14. Comparison of seasonal tension force before and after temperature compensation (Compression type anchor)

일) 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용하여 측정된 앵커의 긴장력 값이 내하체 1(GL-7.1m)과 내하체 2(GL-9.1m)에서 각각 114.69kN 및 116.87kN이었다. 약 1년 6개월간의 측정결과 2011년 7월 25일 측정된 긴장력 값은 내하체 1과 내하체 2에서 각각 109.87kN 및 108.73kN로 약 4.2%, 7.0%의 긴장력 손실이 발생하여 인장형 앵커에 비해 약간 작은 긴장력 손실이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 그림에 나타난 바와 같이 계절별 장력모니터링을 수행하는 동안 기상청에서 측정된 대기온도 변화( $\Delta T$ )는  $-2.2 \sim 27.7^\circ\text{C}$  범위로 발생하였으나 CA-1에서 측정된 긴장력은 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 Figure 7과 같이 현장에서 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용한 지중 온도 변화 측정 검증실험 결과에서 나타난 바와 같이 GL-7.0m 이하에서는 지중온도 변화가  $1.0^\circ\text{C}$  이내로 측정되어 온도변화가 거의 발생하지 않으므로 GL-7.1m와 GL-9.1m에 각각 설치된 광섬유 센서의 긴장력 측정값에는 지중온도변화의 영향이 없는 것으로 판단된다.

Figure 14(b)에 CA-2의 긴장력 모니터링 결과를 나타냈다. 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용하여 측정된 초기 긴장력(2010년 2월 19일)은 내하체 1(GL-5.1m)과 내하체 2(GL-9.1m)에서 각각 68.21kN 및 72.35kN이며 약 1년 4개월 후인 2011년 6월 27일에 측정된 긴장력 값은 내하체 1과 내하체 2에서 각각 65.47kN 및 60.32kN로 약 9.3%와 16.6%의 긴장력 손실이 나타났다. 계절별 장력모니터링을 수행하는 동안 기상청 자료에 의한 대기 온도 변화( $\Delta T$ )는  $-2.2 \sim 27.7^\circ\text{C}$  범위에서 발생하였으며 내하체 1이 위치한 GL-5.1m에서 측정된 지중온도 변화( $\Delta T$ )는 약 1년 6개월 동안  $14.2 \sim 18.7^\circ\text{C}$  범위로 발생하여 내하체 2의 위치(GL-9.1m)와 달리 지중온도 변화( $\Delta T$ )에 대한 영향을 고려하여야 할 것으로 판단되었다. 기상청 지중온도 측정결과와 온도반응계수를 이용하여 식 (3)으로부터 CA-2에서 측정된 긴장력에 대한 지중온도 보상을 실시하여 Figure 14(b)와 같이 나타났다. 그러나 그림에 나타난 바와 같이 온도보상 전후의 긴장력 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로부터 광섬유 센서를 이용한 앵커의 긴장력 측정 시 압축형 앵커와 같이 센서가 상대적으로 깊은 심도(GL-5.0m~7.0m 이상)에 위치한 경우에는 지중온도 변화가 크게 발생하지 않거나 발생하더라도 온도보상의 효과가 크지 않으나, 인장형 앵커의 경우와 같이 광섬유 센서가 앵커의 자유장부에 설치되어 상대적으로 지표면에 가까운 경우(GL-2.0m~GL-3.0m)에는 지중온도 변화가 크게 발생하며 광섬유

센서가 지중온도 변화에 함께 반응하므로 이에 대한 보상을 실시하여 긴장력의 변화만을 측정하여야 함을 알 수 있다. 광섬유 센서를 이용한 앵커의 긴장력 측정 시 지중 온도 보상을 위해서는 동일한 구조를 가진 온도보상용 센서를 추가로 설치하는 것이 가장 바람직하나 본 연구에서 얻어진 결과와 같이 기상청의 지중온도 측정 결과가 있는 지역에서는 제안된 광섬유 센서 내장형 텐던의 온도반응계수를 이용하여 효과적이며 경제적으로 온도보상이 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

앵커나 교량 등 다양한 토목 분야에서 활용되고 있는 7연 강연선에 광섬유 브래그 격자 센서를 내장시켜 개발한 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용하여 실제 절취사면에 시공된 그라운드 앵커의 긴장력 변화를 계절변화에 따라 모니터링할 수 있도록 경제적이고 현실적인 온도보상 방법에 관한 연구를 수행하였다. 연구 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 실내실험을 통해 광섬유 센서 내장형 텐던의 온도 반응계수  $\beta' = 2.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 를 결정하고 얻어진 온도반응계수를 바탕으로 실제 현장에 설치된 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용하여 연구 대상지역(여수)의 지중온도 변화( $\Delta T$ )를 측정하였다. 온도반응계수를 이용한 지중온도 측정의 타당성을 검증하기 위하여 기상청에서 지중온도계로 여수지역에서 측정한 지중온도 변화(기상청:www.kma.go.kr) 데이터를 비교 검증 자료로 이용하였다. 광섬유 센서 내장형 텐던과 기상청 자료의 비교결과 FBG1(GL-3.5m)에서 측정된 지중온도 변화는  $0.0 \sim 2.7^\circ\text{C}$ 범위로 나타났고 기상청 지중온도계 측정결과(GL-3.0m)는  $0.0 \sim 2.5^\circ\text{C}$  범위로 나타나 거의 일치하는 결과를 얻어 광섬유 센서 내장형 텐던의 온도보상계수는 타당함을 알 수 있다.
- (2) 인장형 앵커의 자유장에 설치된 광섬유 센서를 이용하여 1년 이상 반사파장의 변화를 모니터링하고 얻어진 측정결과에 대해 온도반응계수( $\beta'$ )와 그라운드 앵커가 설치된 지역의 기상청 지중온도 측정결과를 이용하여 온도보상을 실시한 결과, 온도보상 후 광섬유 센서 내장형 텐던의 긴장력 값은 계절별로 나타난 지중온도 변화와 무관하게 기존 로드

셀과 유사한 경향을 나타내며 합리적인 결과를 도출하여 효과적인 온도보상이 가능함을 확인하였다.

- (3) 또한 압축형 앵커의 내하체 주변에 설치된 광섬유 센서로부터 얻어진 반사파장에 대한 모니터링을 실시하고 긴장력으로 환산하여 온도보상에 대한 영향을 검토한 결과, G.L-7.0m 이상의 심도를 갖는 내하체에서는 지중온도 변화가 미미하여 온도보상의 필요성이 없으며 GL-5.0m 깊이의 내하체 주변에서도 지중온도보상 전후의 긴장력 차이가 크지 않아 압축형 앵커의 경우 긴장력 관리에 광섬유 센서를 적용할 경우 온도보상은 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.
- (4) 광섬유 센서의 온도보상을 위해서는 동일한 구조를 갖는 추가의 센서를 매립하는 것이 가장 효과적일 수 있으나 본 연구에서 제안된 방법은 온도보상을 위한 추가의 광섬유 센서나 특수한 센서의 제작이 필요치 않으므로 매우 실용적이면서도 경제적으로 적용할 수 있는 것으로 나타나 향후 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용한 장기적인 그라운드 앵커 장력관리에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2010년도 소방방재청 자연재해저감 기술사업 『감지형 앵커의 긴장력과 사면 안정성의 상관성 연구과제』(자연재해2010-37) 및 교육과학기술부 한국연구재단 기초연구사업 『광섬유 센서 매립형 텐던을 이용한 앵커의 하중전이 특성 연구』(2010-0024625)의 지원을 받아 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. Chang, K. T., Han, H. S., and Yoo, B. S. (2003), "Estimation of Slope Behavior by Soil Temperature", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.19, No.6, pp.407-418.
2. Chun, B. S., Nam, S. S., and Choi, H. G. (1993), "Failure Case Study of Retaining Wall Site Measuring Measurement", *Proceedings of Korea Society of Civil Engineers (KSCE) Conference 1993*, KSCE, pp.629-632.
3. FHWA-IF-99-015 (1999), "Ground Anchors and Anchored Systems".
4. Haran, F. M., Rew, J. K., and Foote, P. D. (1998), "A strain-isolated fibre Bragg grating sensor for temperature compensation of fibre Bragg grating strain sensors", *Measurement of Science Technology*, Vol.9, No.8, pp.1163-1166.
5. Hill, K. O. and Meltz, G. (1997), "Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview", *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol.15, No.8, pp.1263-1276.

6. Hong, W. P., Yun, J. M., and Song, Y. S. (2004), "Lateral Earth Pressure acting on Anchored Retention Walls installed in Cut Slope", *Journal of KSCE*, Vol.24, No.2, pp.125-133.
7. Huh, B. J., Kim, C. K., Jung, Y. G., and Chun, B. S. (2010), "A Study on the Long-Term Behavior Characteristics of Buoyancy-Resistant Permanent Anchor", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.11, No.12, pp.27-35.
8. Iwashima, T., Inoue, A., Shigematsu, M., Nishimura, M., and Hattori, Y. (1997), "Temperature compensation technique for fiber bragg gratings using liquid crystalline polymer tubes", *ELECTRONICS LETTERS*, Vol.33, No.5, pp.417-418.
9. James, S. W., Dockney, M. L., and Tatam, R. P. (1996), "Simultaneous independent temperature and strain measurement using in fibre Bragg grating sensors", *ELECTRONICS LETTERS*, Vol.32, No.12, pp.1133-1134.
10. Jung, D. W. (2005), "Fabrication of A-EFPI and temperature-compensated FBG fiber optic sensors, and their applications to strain measurement", *Master Thesis*, Hanyang University.
11. Jung, J. H., Nam, H., Lee, J. H., Park, N. K., and Lee, B. H. (1999), "Simultaneous measurement of strain and temperature by use of a single-fiber Bragg grating and erbium-doped fiber amplifier", *APPLIED OPTICS*, Vol.38, No.13, pp.2749-2751.
12. Kim, J. M., Kim, Y. S., Kim, H. W., Seo, D. N., and Yun, C. B. (2007), "Development of Smart Tendon Instrumented With Optical FBG Sensors", *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol.20, No.2, pp.121.
13. Kim R. H., Lee, W. J., Yoon, H. K., and Lee, J. S. (2009a), "Development of Temperature Compensated Micro Cone by using Fiber Optic Sensor", *Journal of KSCE*, Vol.29, No.4, pp.163-174.
14. Kim, Y. S., Seo, D. N., and Kim, J. M. (2008), "Development and Application of A Smart Anchor With Optical FBG Sensors", *Proceedings of KGS Spring National Conference 2008*, pp.393-398.
15. Kim, Y. S., Seo, D. N., Kim, J. M., and Sung, H. J. (2009b), "Load Transfer Characteristics of the 7-wire strand using FBG Sensor Embedded Smart Tendon", *Journal of Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol.9, No.5, pp.79-86.
16. Kim, Y. S., Sung, H. J., Kim, H. W., and Kim, J. M. (2011), "Monitoring of tension force and load transfer of ground anchor by using optical FBG sensors embedded tendon", *Smart Structures and Systems*, Vol.7(4), pp.303-317.
17. Moerman, W., Taerwe, L., Waele, W. D., Degrieck, J., and Himpe, J. (2005), "Measuring Ground Anchor Forces of a Quay Wall with Bragg Sensors", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.131(2), pp.322-328.
18. Sung, H. J., Kim, Y. S., Kim, J. M., and Park, G. H. (2011), "Tension Force Monitoring of Tension Type Ground Anchor Using Optical FBG Sensors", *Journal of KGS*, Vol.29, No.6, pp.17-26.
19. Yhim, S. S., Lee, J. S. (1999), "Determination of Initial Prestress Force of Earth Anchors in Rock on Excavation", *Journal of KSCE*, Vol.19, No.3-1, pp.177-187.
20. Zhou, Z. and Ou, J. (2004), "Techniques of temperature compensation for FBG strain sensors used in long-term structural monitoring", *APCOM 2004*, Khabarovsk, Russia, pp.465-471.

(접수일자 2011. 11. 7, 심사완료일 2012. 5. 4)