

FBG센서가 내장된 스마트 텐던을 이용한 7연 강연선의 인발 하중전이 특성

Load Transfer Characteristics of the 7-wire strand using FBG Sensor Embedded Smart Tendon

김영상* · 서동남** · 김재민*** · 성현종****

Kim, Young-Sang · Suh, Dong-Nam · Kim, Jae-Min · Sung, Hyun-Jong

Abstract

With the substantial increase of the size of structure, the management of excavation becomes more difficult. Therefore, massive collapses which are related to retaining wall recently increase. However, since the study on measuring and monitoring the pre-stressing force of anchor is insufficient, behavior of anchor may not be predicted and monitored appropriately by the existing strain gauge and load cell type monitoring system. FBG Sensor, which is smaller than strain gauge and has better durability and does not have a noise from electromagnetic waves, is adapted to measure the strain and pre-stressing force of 7-wire strand, so called smart tendon. A series of pullout tests were performed to verify the feasibility of smart tendon and find out the load transfer mechanism around the steel wire tendon fixed to rock with grout. Distribution of measured strains and estimated shear stresses are compared with those predicted by theoretical solutions. It was found that developed smart tendon can be used effectively for measuring strain of 7-wire strand anchor and theoretical solutions underestimate the magnitude of shear stress and load transfer depth.

Key words : FBG sensor, smart tendon, anchor, load transfer

요 지

최근 도심 구조물의 규모가 급격히 대형화됨에 따라 인접구조물이 존재하는 상태에서 대규모의 기초구조물의 설치를 위한 넓고 깊은 범위의 굴착이 빈번히 시행되고 있어 안전관리의 중요성이 크게 부각되고 있다. 시공 및 사용 중에 토류구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 쏘일앵커, 쏘일네일 및 락앵커 등의 지반보강재에 작용하는 프리스트레스 하중(prestress force) 및 변형을 지속적이고 효과적으로 관측할 수 있는 방법이 필요하다. 그러나 현재 현장에서 주로 사용되는 전기저항식 로드셀과 스트레인게이지, 바이브레이팅 타입의 변형율계를 이용한 변형 및 장력의 측정은 센서 자체의 자기열화 특성 때문에 장기적인 모니터링에는 효과적이지 않을뿐더러 시험체 내부에서 다수의 측정점을 측정하기 위해서는 많은 스트레인게이지를 설치하기 위해 리드선의 공간이 크게 필요한 단점이 있다. FBG(Fiber Bragg Grating)센서는 스트레인게이지와 비교해서 매우 작은 직경을 가지며 전자기파에 의한 노이즈가 없고 내구성이 커서 장기적인 모니터링이 필요한 구조물에 매우 유용하게 사용될 수 있다. 본 연구에서는 7연 강연선의 센터 킹케이블에 FBG 센서를 내장한 스마트 텐던을 이용하여 토류구조물의 보강에 활용되고 있는 앵커와 주변 그라우트면의 하중전이 특성에 대한 일련의 실내실험 결과를 기술하였다. 연구결과 스마트 텐던은 기존의 스트레인게이지 변형율계로는 마땅히 측정할 수 없던 7연 강연선과 그라우트면의 변형률을 매우 효과적으로 측정할 수 있을 뿐 아니라 하나의 선으로 여러 위치의 변형을 효과적으로 측정할 수 있어 지반보강재의 장력모니터링 뿐만 아니라 그라우트로 부착된 부분의 하중전이 특성을 효과적으로 파악할 수 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 브래그격자(FBG)광섬유센서, 스마트 텐던, 앵커, 하중전이

*정회원 · 전남대학교 공학대학 건설 · 환경공학부 조교수 (E-mail: geoykskim@chonnam.ac.kr)

** (주)다산이엔지 주임

*** 전남대학교 공학대학 건설 · 환경공학부 교수

**** 전남대학교 공학대학 건설 · 환경공학부 박사과정

1. 서 론

최근 들어 구조물이 대규모화되면서 지하구조물과 기초 설치를 위한 흙막이 굴착의 규모가 크게 증가하고 있으며 시공 중 및 유지 시 관리가 곤란하여 국내 대형공사들에서 흙막이 공법과 관련된 붕괴 사고가 빈번히 발생하고 있다. 뿐만 아니라 도시가 팽창하고 국토개발이 다양하게 진전됨에 따라 도로나 주택단지 건설 등에 의한 산지나 구릉지를 절개하는 사례가 빈번해지면서 사면의 보강대책으로 영구앵커의 적용이 빈번해지고 있다.

하지만 현장에 설치된 앵커의 하중-변형거동은 설계 시 가정된 이론과 동일하지 않으며 설치 후 시간이 경과함에 따라 국부적인 지반변형의 증가로 보강재에 적용되었던 긴장력이 감소하여 안정하여야 할 지하구조물이 예기치 않은 급작스러운 파괴에 도달하기도 한다. 특히 영구적인 지반구조물의 보강을 위하여 설치되는 영구앵커 등의 지반보강재는 구조물과 수명을 같이 하기 때문에 장기간 동안 구조물의 안전에 미치는 영향이 크다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 다양한 장기모니터링 기법이 개발되고 있으나 전기저항식 스트레인지이지나 바이브레이팅 와이어(vibrating wire) 타입의 기존 모니터링 방법으로는 앵커를 구성하고 있는 강연선의 변형률 및 장력 측정이 세밀하게 이루어질 수 없고 특히 센서의 수명이 장기적인 모니터링에 한계를 가지고 있다.

이에 본 연구에서는 기존 스트레인지이지 타입에 비해 크기가 작고 내구성이 우수하며 전자기파에 의한 노이즈 발생이 없고 하나의 리드선으로 다중점 측정(multiplexing)이 가능한 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating ; FBG)센서(김기수 등, 2005, Hill et al., 1997)를 내장한 스마트 텐던

을 모형 앵커에 적용하여 스마트 텐던의 지반 보강재 활용 가능성을 검증하였다. 이를 위하여 2종류의 그라우트 직경을 갖는 스마트 텐던에 대하여 실내 모형 인발실험을 수행하였으며 광섬유 센서로부터 하중전이 특성을 측정하고 기존 이 론식과 비교하였다.

2. FBG를 삽입한 스마트 텐던의 역학적 특징

본 연구에서 활용한 스마트 텐던은 김재민 등(2007), 김영상 등(2009)이 7연 강연선의 변형률 및 장력변화를 효과적으로 모니터링 할 수 있도록 강연선 중앙 케이블 내부에 FBG센서를 삽입하여 개발하고 검증한 새로운 개념의 텐던이다. 스마트 텐던은 그림 1과 같이 강연선의 중앙 킹케이블을 중공 강재 튜브 내경($\phi 1.0\sim 2.0$ mm)로 교체한 후, 튜브 내부에 광섬유 센서를 삽입하고 접착제(폴리에스터레진+경화제)를 주입하여 케이블과 일체가 되도록 한 7연 강연선이다(김재민 등, 2007).

김재민 등(2007)과 김영상 등(2008)은 스마트 텐던의 성능 검증을 위한 다양한 재료 및 역학 실험을 수행하였다. 그림 2는 중앙 케이블과 교체된 중공 튜브와 삽입된 FBG 센서의 일체화 실험 결과로 인장실험을 통하여 스마트 킹케이블에 내장된 FBG 센서의 변형률과 외부에 부착된 스트레인지이지로부터 측정된 변형률을 비교한 결과 FBG 센서와 전기저항식 스트레인지이지의 변형률 계측 결과가 매우 일치하였으며, FBG 센서가 전기저항식 스트레인지이지에 비해 잡음(noise)이 적게 발생함을 알 수 있어 센서로서의 기능이 우수함을 검증하였다.

한편 중앙 케이블이 중공 튜브로 교체된 중공 7연 강연선의 역학적 거동 변화를 확인하기 위하여 중공 7연 강연선에

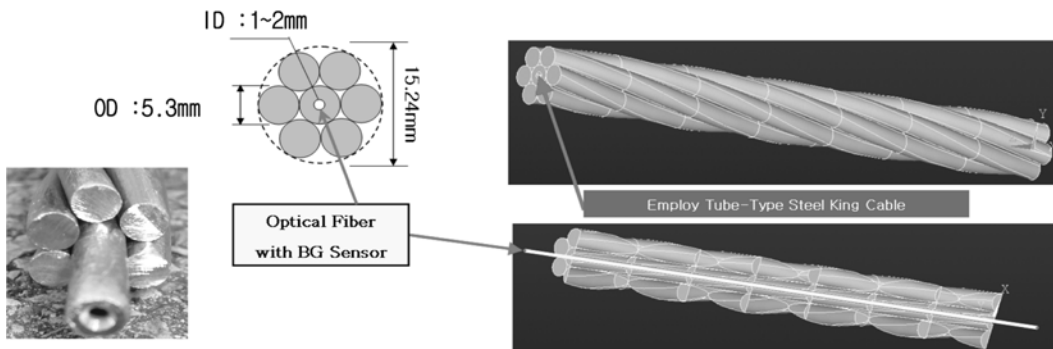


그림 1. 스마트 텐던의 개념도.

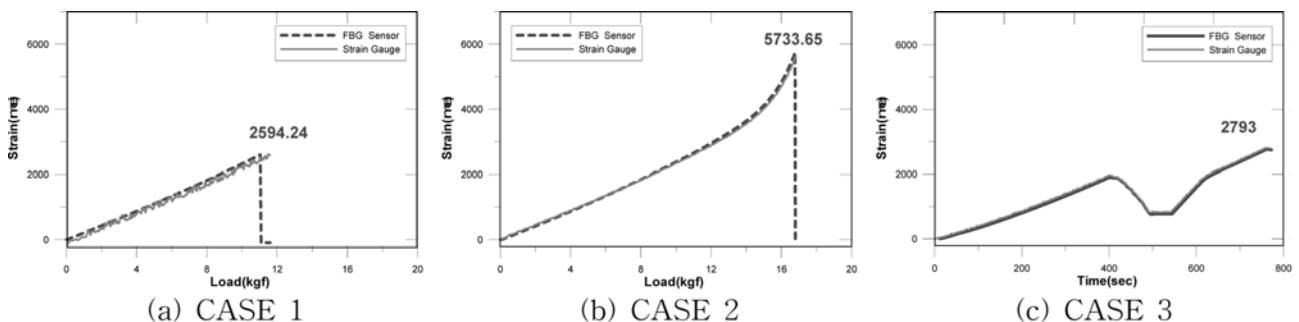
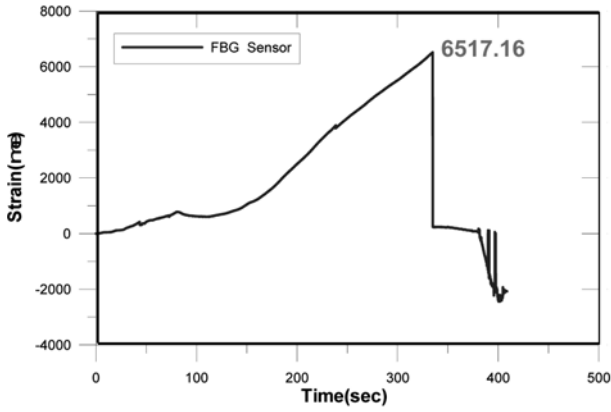
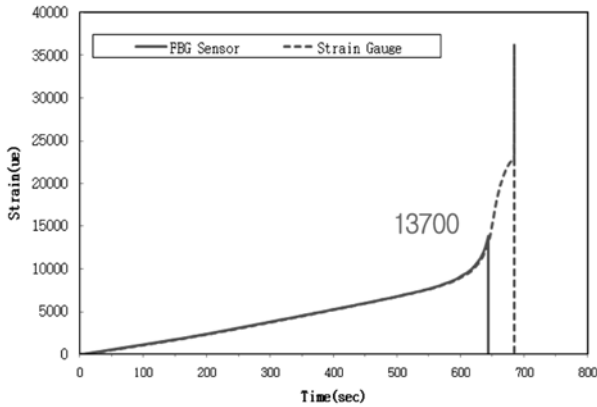


그림 2. 중공 킹케이블 성능실험 결과(김재민 등, 2007).



(a) 1차 인장실험결과(김재민 등, 2007)



(b) 2차 인장실험결과(김영상 등, 2009)

그림 3. 스마트 텐던의 인장실험 결과.

대하여 2차례에 걸쳐 인장실험을 실시하였으며 그림 3에 그 결과가 도시되었다. 1차 인장실험 결과 스마트 텐던에 내장된 FBG센서의 최대 측정범위는 약 6500 $\mu\epsilon$ 이었으나, 에폭시 주입제의 성능을 개선하여 제작된 스마트 텐던에 대한 2차 인장실험 결과 FBG센서의 최대 측정범위가 약 13700 $\mu\epsilon$ 로 증가함을 확인하였다. 두 번의 실험결과와 스트레인게이지와의 변형률 비교를 바탕으로 스마트텐던은 효과적으로 강연선의 변형률을 측정할 수 있음을 확인하였고, 일반적으로 앵커의 변형률 측정 범위인 8000 $\mu\epsilon$ 을 초과하여 측정할 수 있으므로 지반보강재의 모니터링을 위한 활용에 적합할 것으로 판단되었다.

3. 그라운드 앵커의 하중전이

3.1 앵커의 전단응력 분포에 대한 이론식

앵커의 하중전이에 의한 응력분포에 대한 Farmer(1975)와 Aydan 등(1993, 1995)의 연구에서는 텐던-그라우트 경계면의 하중전달기구(load transfer mechanism)는 그림 4와 같이 텐던에 작용된 인장응력 σ_0 가 텐던-그라우트 경계면을 따라 전단응력 τ_{tg} 으로 전달되는 것으로 가정되었다.

Farmer(1975)는 그라우트-암반 접촉면에서 수직변위가 없다는 가정 하에서 텐던-그라우트 접촉면에서의 전단응력을 다음 식(1)과 같이 유도하였다.

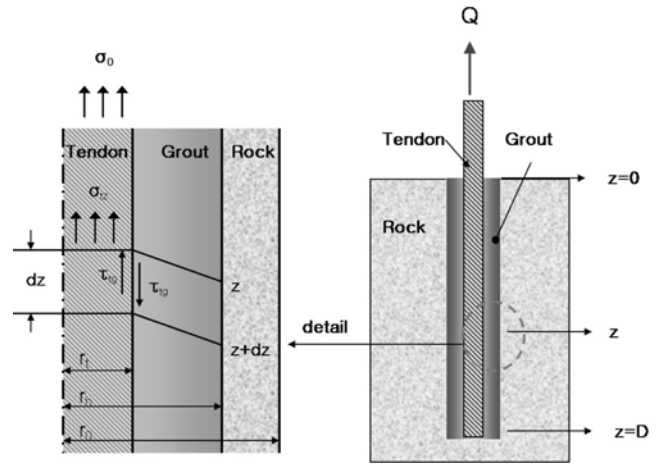


그림 4. 텐던-그라우트 경계면에서의 전단응력.

$$\tau_{tg} = \frac{1}{2} \cdot \gamma_t \cdot \Omega \cdot \sigma_0 \cdot e^{-\Omega z} \quad (1)$$

여기서,

- τ_{tg} : 깊이 z 에서의 텐던-그라우트 경계면의 전단응력, r_t : 텐던의 반경
- r_h : 천공경의 반경, σ_0 : 텐던 상단의 작용응력, z : 앵커 고정상단으로부터의 깊이

한편 식 (1)에서 Ω 는 천공반경 r_h 과 텐던 반경 r_t 에 따라 식 (2.a), (2.b)와 같이 정의되며, R 은 텐던 탄성계수 E 와 그라우트의 탄성계수 E_g 의 비이다.

$$\Omega = \left[\frac{R}{r_t(r_h - r_t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (r_h - r_t < r_t) \quad (2.a)$$

$$\Omega = \left[\frac{R}{r_t^2 \ln\left(\frac{r_h}{r_t}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (r_h - r_t > r_t) \quad (2.b)$$

$$R = \frac{E_g}{E_t} \quad (3)$$

Aydan 등(1993, 1995)은 그라우트-암반 접촉면에서의 수직 변위(w_h)를 고려하여 Farmer가 제안한 식을 확장하였으며 텐던-그라우트 접촉면에서의 전단응력(τ_{tg})을 식(4)와 같이 유도하였다.

$$\tau_{tg} = G_g \frac{w_t - w_h}{r_t \ln\left(\frac{r_h}{r_t}\right)} \quad (4)$$

여기서,

G_g : 그라우트의 전단탄성계수

$w_t = \frac{\sigma_0 \cosh[\lambda(D-z)]}{E_t \lambda \sinh(\lambda D)}$: 텐던과 그라우트 접촉면에서의 z 방향 변위

$w_h = \frac{w}{K_z}$: 그라우트와 주변 암반 접촉면에서의 z 방향 변위

$$\lambda^2 = \frac{2K_g}{r_i E_t}, \quad D: \text{텐던의 길이}$$

$$K_z = \frac{G_r \ln(r_h/r_i)}{G_g \ln(r_0/r_h)} + 1, \quad G_r: \text{암반의 전단탄성 계수}$$

3.2 실험에 의한 지반보강재의 하중전이 측정 사례

김낙경(2001)은 풍화토 지반에 설치된 인장형 앵커와 압축형 앵커의 강연선 외부와 그라우트에 스트레인이케이지와 매입형 게이지를 설치하고 재하시험을 실시하여 그라우트와 강연선의 하중전이 분포를 측정하였다. 실험결과 인장형 앵커는 앵커의 정착장 시점부에서부터 지반으로 하중이 전달되었으며, 압축형 앵커는 앵커의 끝단에서부터 마찰저항이 시작되는 것이 확인되었다. 임경필 등(1999)은 콘크리트 모형 암반에 설치된 강봉에 다수의 스트레인이케이지를 부착하고 암반 앵커의 텐던-그라우트 경계면에서 하중전달기구를 규명하기 위한 정적 인발실험을 수행하였다. 실험결과에 대한 회귀분석을 통하여 텐던-그라우트 경계면의 전단응력 분포에 관한 경험식을 산정하였으며, 실험에 의한 전단응력 분포는 텐던 직경의 2~3배 깊이에서는 이론에 의한 전단응력 분포 보다 작게 나타나고 그 이하에서는 반대 현상이 관찰되었다. 전상수 등(2008)은 단일철근 형태의 네일과 다철근 네일에 전기저항식 변형률계를 부착하여 네일 두부에 작용하는 인발하중에 의한 네일 심도별 하중전이를 측정하였다. 실험결과 단철근 네일은 재하된 하중의 대부분을 네일의 상부에서 저항하였으며, 다철근 네일은 하중전이가 네일의 선단까지 비교적 선형적으로 발생하였다.

한편 하중전이 측정에 FBG센서를 사용한 사례로는 이원제 등(2001)이 매입말뚝공법 중공부에 광섬유격자센서 및 진동

현식 스트레인이케이지를 함께 설치한 후 정재하시험을 수행하여 말뚝 축력과 하중전이를 측정한 바 있으며, 실험결과와 반사파장 변화와 변형률간의 상관성을 구하였으며 두 측정시스템간의 양호한 일치성을 확인하였다. 또한 실내 모형말뚝의 재하시험 결과 두 측정값은 5~20%의 차이를 보였으며, 하중 재하 단계별로 발생하는 변형률의 선형성이 FBG 센서가 우수한 것으로 나타났다. 국외에서 Zhu et al.(2007)은 쏘일네일에 전기저항식 스트레인이케이지와 FBG센서를 적용하여 인발실험을 통해 각각 변형률을 모니터링 하였다. 모니터링 결과 모든 타입의 센서로부터 측정된 변형률이 잘 일치하였으며, 모니터링 동안 네일을 따라 선형적인 축변형률 분포가 측정되었다.

이상에서 살펴 본 바와 같이, 강봉을 이용하는 네일 및 말뚝의 하중전이 측정에는 전기저항식 스트레인이케이지와 FBG 센서가 비교적 성공적으로 적용된 바 있으나 강연선으로 이루어진 앵커의 경우에는 외부에 설치되는 진동현식 게이지만 이용되었을 뿐 강연선의 내부 변형률이 직접 측정된 사례는 전무하다.

4. 스마트 텐던을 이용한 7연 강연선의 인발실험 결과

4.1 실험장치 및 과정

앵커의 정착장 설계는 그라우트-텐던의 부착저항과 그라우트-지반의 주면마찰저항으로부터 정착깊이를 각각 산정하여 이 중 큰 값으로 결정된다. 현재 설계 방법에서는 앵커와 지반 및 그라우트 사이에 발생하는 마찰응력과 부착력의 실제적인 분포를 무시하고 앵커에 작용하는 마찰저항이 길이 방

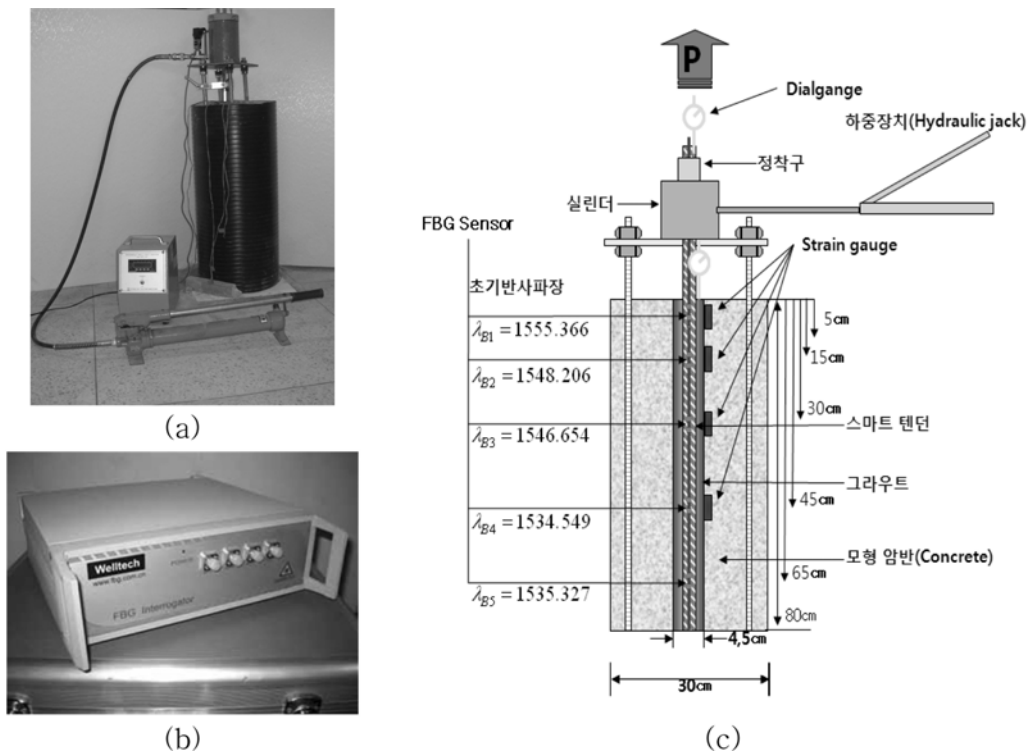


그림 5. 인발실험 setup, 측정장치(인터로게이터) 및 초기 반사파장(서동남, 2008).

향으로 일정하게 분포한다는 가정 하에 앵커의 정착깊이를 결정하고 있다. 그러나 앵커의 경제적인 설계를 위해서는 텐던-그라우트, 그라우트-지반 경계면에 작용하는 마찰저항의 크기와 분포를 고려한 정착장 설계방법이 합리적이라 할 수 있으나 강봉의 경우와 달리 강연선과 그라우트의 경계면에 작용하는 응력을 측정하기 위한 효과적인 방법이 제시되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 스마트 텐던을 이용하여 단선 강연선의 내부 변형과 텐던-그라우트 접촉면에서의 하중전달 메커니즘을 측정하기 위한 일련의 모형 앵커 실내실험을 수행하였다.

그림 5(c)와 같이 5개의 FBG 센서가 새겨진 0.8m 길이의 스마트 텐던을 콘크리트로 만들어진 모형암반에 삽입하고 4cm(CASE 1)와 5cm(CASE 2) 직경의 그라우트를 타설하여 실험체를 제작하였으며 상부에는 인발실험을 위해 하중장치를 설치하였다(그림 5(a) 및 (c)). 텐던-그라우트 접촉면에서의 변형률은 그림 5(c)에 나타난 바와 같이 스마트 텐던에 내장된 서로 다른 반사파장을 갖는 5개의 브래그 격자에서 측정된다. 하중전이에 대한 기존 연구결과 상부에서 대부분의 마찰저항이 집중되는 점을 고려하여 상부에서 조밀하고 하부로 갈수록 넓은 폭을 갖도록 FBG센서를 위치하였다. FBG 센서로부터 반사된 파장은 Welltech사의 FBG 인터로게이터(그림 5(b))를 이용하여 측정하였다.

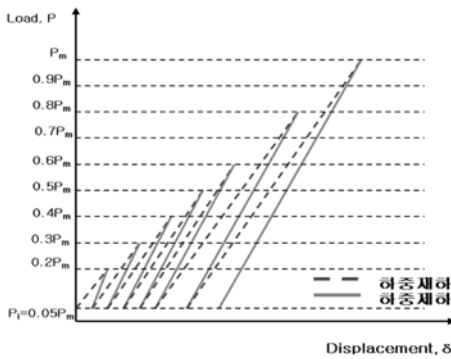
인발실험은 정적인 반복재하에 의해 실시하였으며 초기하중은 0.5 tonf, 최대하중은 10.0 tonf로 총 7단계(2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 tonf)의 하중을 그림 6(a)와 같이 재하하였다. 실험 결과 그림 6(b)와 같이 그라우트와 암반의 부착파괴가 발생하여 실험을 종료하였으며 이때 작용하중은 9.2 tonf이다.

4.2 FBG 센서에서 측정된 강연선의 변형률

FBG 센서에서 측정된 반사파장의 변화 $\Delta\lambda_B$ 는 식 (5)로부터 변형률의 변화량 $\Delta\varepsilon$ 으로 변환되었으며 그 결과가 재하과정(그림 7(a), 8(a))과 깊이별(그림 7(b), 8(b))로 나타나 있다.

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{(1-P_e)} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (5)$$

그림 7은 CASE 1 그라우트직경(d=4cm)에 대한 재하실험 으로부터 얻어진 강연선의 재하과정 및 깊이에 따른 변형률 분포로 재하과정에 따른 변형률 분포에서는 시험이 종료될 때까지 5개의 FBG 센서가 효과적으로 강연선의 변형을 측정하며 7단계의 단계하중 별로 재하(load)와 제하(unload)를 잘 나타냈다. 깊이별 변형률 분포는 낮은 하중 단계(500~2000 kgf)에서는 강연선의 하부까지 작용하중이 전달되지 못하지만 하중이 증가함(3000~8000 kgf)에 따라 작용하중이 하부로 전달되어 변형이 발생되며 같은 하중 단계에서는 깊이가 증가함에 따라 변형률이 급격히 감소되는 것을 확인

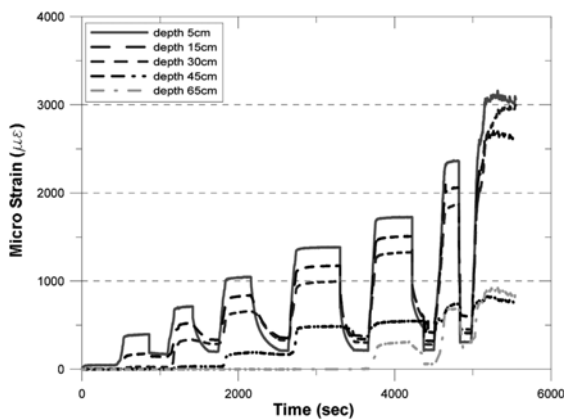


(a) 인발실험 재하 사이클

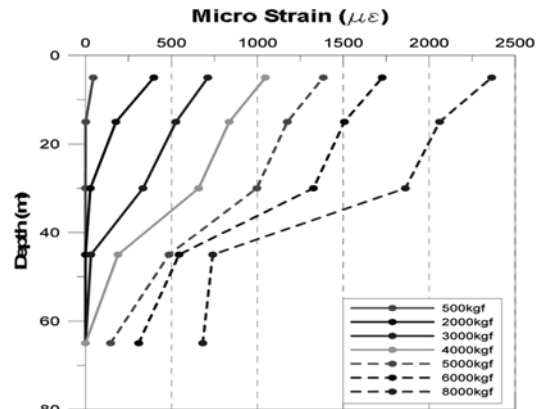


(b) 그라우트-암반 부착파괴

그림 6. 인발실험 재하 사이클 및 그라우트-암반 부착파괴 사진.



(a) 재하하중에 따른 위치별 변형률 측정결과



(b) 작용하중에 따른 깊이별 변형률 분포

그림 7. FBG 센서로부터 측정된 강연선의 변형률 분포(CASE 1 : d=4cm).

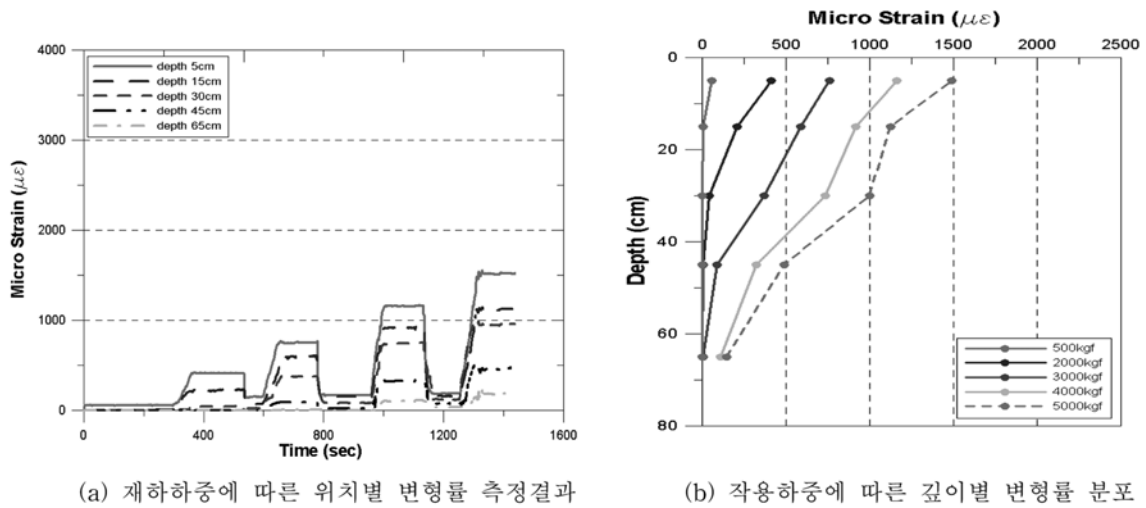


그림 8. FBG 센서로부터 측정된 강연선의 변형률 분포(CASE 2 : d=5 cm).

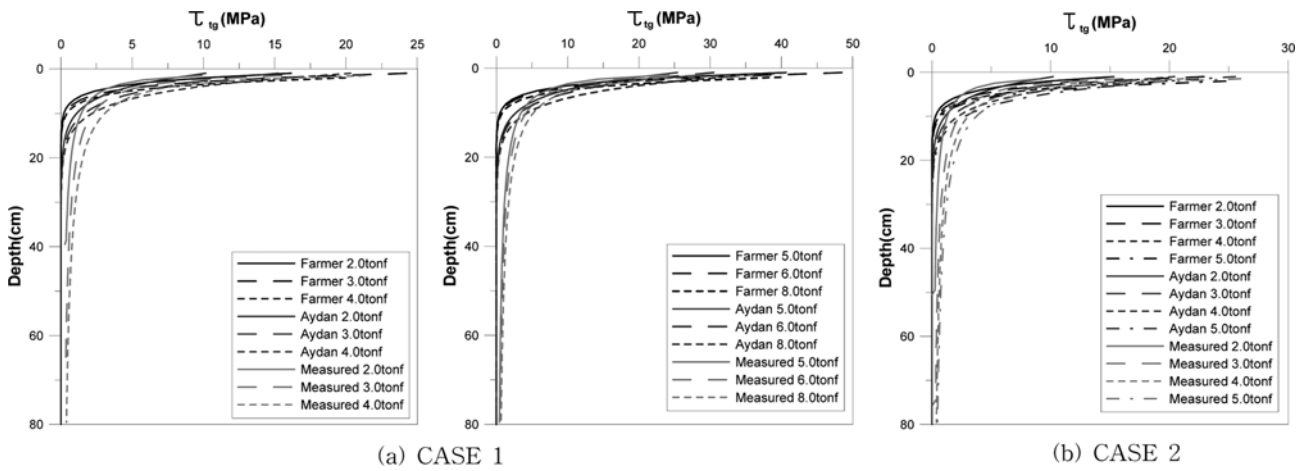


그림 9. 강연선-그라우트 접촉면의 전단응력 분포.

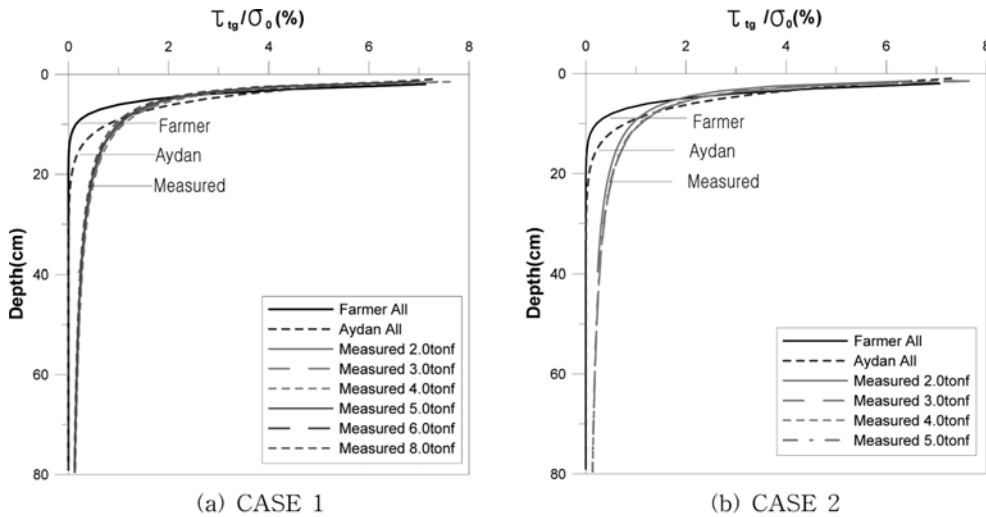


그림 10. 강연선-그라우트 접촉면의 정규화된 전단응력 분포.

하여 현재 설계와 달리 비선형적인 전단응력 분포와 하중증가에 따른 전이가 발생함을 확인할 수 있다.

그림 8은 CASE 2(d=5 cm) 강연선의 하중단계 및 깊이에 따른 변형률 분포로 5.0 tonf의 하중 단계까지 강연선의 변형률을 측정하였으며, CASE 1과 비교해 보면 깊이별 변형률 분포는 비슷하지만 CASE 2의 변형률이 약간 더 크게 측정되었다.

4.3 측정된 변형률을 이용한 전단응력 분포 비교

스마트 텐던의 FBG 센서로 측정된 변형률은 모두 5점으로 격자와 격자 사이의 간격이 비교적 크기 때문에 측정된 값에 대한 회귀분석을 통해 연속함수 형태로 표현한 뒤 모든 깊이에서의 변형률을 추정하였다. 미소한 깊이증가에 대하여 식 (6)을 이용하여 강연선-그라우트 접촉면에서의 전단응력을 산

정하였으며 그림 9에 나타났다. 그림에는 Farmer와 Aydan의 이론식으로부터 작용하중 변화에 따른 깊이별 전단응력을 산정하여 스마트 텐던의 전단응력과 비교하여 나타났다.

$$\tau_{lg} = \frac{E_t \cdot \gamma_t}{2d} \cdot d\epsilon \quad (6)$$

여기서, τ_{lg} : 두 변형률점 사이의 평균 전단응력, d : 두 변형률점 사이의 거리, $d\epsilon$: 두 변형률점에서 측정된 변형률 차이, E_t : 텐던의 탄성계수

그림 9로부터 하중단계가 증가함에 따라 전단응력의 크기가 증가하며 전달되는 하중깊이가 증가하는 것을 알 수 있다. 이때 깊이에 따른 전단응력 분포의 형상이 거의 유사하므로 강연선의 상부에 작용하는 작용응력(σ_0)으로 정규화하여 그림 10에 나타났다.

스마트 텐던에서 추정된 정규화된 전단응력 분포와 Farmer와 Aydan의 이론 해들에 의한 정규화된 전단응력을 비교하면, 스마트 텐던을 이용한 단선 앵커의 인발실험 결과도 좁은 폭을 가지며 이론식과 유사한 형태를 갖는 것으로 나타났다. 그러나 형태는 유사하게 보이지만 Aydan의 이론식과 Farmer가 제안한 이론식이 실제 측정 결과보다 작게 나타남을 알 수 있다. 이론식들 중에서 Farmer가 제안한 이론식이 Aydan의 이론식에 의해 결정된 전단응력 값보다 작게 표현되며 이러한 결과는 임경필 등(1999)과 원상연 (2001)의 강봉에 대한 인발실험 연구도 일치한다. 이는 Farmer가 제안한 이론식은 강연선-그라우트 경계면에서 미끄러짐이 일어나지 않는다는 비현실적인 가정 하에 전단응력 분포를 제시하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 원상연 등(2001)의 연구에서는 Aydan의 이론식과 강봉 실험에서 측정된 전단응력 분포가 거의 유사한 것으로 나타났으나 스마트 텐던으로 측정된 강연선 주변의 전단응력 분포는 두 이론식과 전단응력 값과 하중전달 깊이 면에서 일치하지 않는 것으로 나타났다. 이는 Farmer와 Aydan이 제시한 이론식들이 강봉 같은 비교적 등방의 균질한 재료에 적합한 식이기 때문으로, 7연 강연선 내부의 케이블간의 복잡한 상호작용에 의한 변형거동과 전단응력을 표현하기는 어려운 것으로 판단된다.

스마트 텐던은 하중증가에 따라서 7연 강연선 내부에 발생하는 변형율을 매우 효과적으로 측정할 수 있는 것으로 나타났으며 이를 이용하면 강연선의 하중전이 특성에 대한 추가적인 연구를 통하여 전단응력의 크기와 전달 깊이를 표현할 수 있는 경험식의 도출이 가능할 것으로 사료된다.

5. 결 론

앵커나 교량 등 다양한 토목 분야에서 활용되고 있는 7연 강연선에 광섬유 브래그 격자 센서를 내장하여 개발된 스마트 텐던을 이용하여 7연 강연선 앵커와 그라우트 접촉면에서의 하중전이 측정에 대한 연구를 수행하였다. 연구 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 한 줄에 서로 다른 초기 반사과장을 갖는 5개의 FBG 센서가 새겨진 0.8 m 길이의 스마트 텐던을 이용하여

모형 앵커 인발실험 장치를 제작하여 인발실험을 수행한 결과, 5개의 FBG 센서들이 각 하중단계에서 재하 및 제하과정을 따라서 효과적으로 변형률을 측정하였다.

- 2) 스마트 텐던에서 측정된 변형률을 분석한 결과 낮은 하중단계에서는 텐던의 하부까지 작용하중이 전달되지 못하지만 하중이 증가함에 따라 점차로 하부로 변형이 전이되는 하중전이를 확인할 수 있으며 같은 하중 단계에서는 깊이가 증가함에 따라 변형률이 급격히 감소하는 특성을 명확히 관찰할 수 있다.
- 3) 기존 이론식들로 7연 강연선과 그라우트 접촉면의 변형률과 전단응력을 예측하면 하중전이 깊이와 전단응력의 크기가 과소평가되는 것으로 나타났으며, 이는 기존 이론이 7연 강연선과 같은 복잡한 형상을 갖는 케이블간의 상호작용에 의한 변형거동을 표현하기 어렵기 때문으로 판단된다.
- 4) Farmer가 제안한 이론식은 Aydan의 이론식에 의해 결정된 전단응력 값과 하중전달 깊이면에서 작게 예측하였으며 이는 Farmer가 제안한 이론식은 텐던-그라우트 경계면에서 미끄러짐이 일어나지 않는다는 비현실적인 가정 하에 전단응력 분포를 제시하였기 때문인 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김기수, 송영철, 방기성, 윤덕중 (2005) 광섬유센서의 사회기반 구조물에서의 활용. **한국복합재료학회논문집**, 한국복합재료학회, 제18권, 제3호, pp. 59-64.
- 김낙경 (2001) 인장형 앵커와 압축형 앵커의 하중전이에 관한 연구. **한국지반공학학회논문집**, 한국지반공학학회, 제17권, 제3호, pp. 59-68.
- 김영상, 김재민, 성현중, 김현우 (2009) 스마트 텐던 기술 이전 및 상용화를 위한 추가 기술 개발, 건설교통 R&D 정책·인프라 연구개발계획서, 전남대학교.
- 김영상, 서동남, 김재민 (2008) FBG 센서를 내장한 스마트 앵커의 개발과 적용. **한국지반공학학회 봄학술발표회논문집**, 한국지반공학학회, pp. 393-398.
- 김재민, 김영상, 김현우, 서동남, 윤정방 (2007) FBG 센서를 내장한 스마트 강연선 개발. **전산구조공학학회논문집**, 전산구조공학학회, 제20권, 제2호, pp. 121.
- 서동남 (2008) FBG 센서를 내장한 스마트 앵커의 개발과 하중전이 해석, 석사학위논문, 전남대학교.
- 원상연 (2001) 정적 및 반복하중 받는 락앵커의 거동, 박사학위논문, 국민대학교.
- 이원제 (2000) 매입말뚝의 하중전이 해석 및 지지력 특성 평가, 박사학위논문, 고려대학교.
- 이원제, 김대규, 이우진 (2001) 광섬유 격자센서를 이용한 매입말뚝의 하중전이 측정. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제21권, 제3-C호, pp. 311-319.
- 임경필, 조남준, 황성일 (1999) 정적 인발하중을 받는 암반 앵커의 거동 ; 텐던-그라우트 경계면의 전단응력 분포. **한국지반공학학회논문집**, 한국지반공학학회, 제15권, 제6호, pp. 143-154.
- 전상수, 김두섭, 장양원 (2008) 다철근 네일의 현장인발시험 및 수치해석. **한국지반공학학회논문집**, 한국지반공학학회, 제24권, 제8호, pp. 43-52.
- Aydan, O., Ebisu, S. and Komura, S. (1993) Pull-out tests of rock anchors and their failure models. *Proc. of the Int. Symp. on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock*

- Engineering*, Istanbul, Turkey, pp. 285-293.
- Aydan, O., Komura, S., Ebisu, S. and Kawamoto, T. (1995) A unified design method for anchor foundations of super-high pylons. *Proc. of the Int. Workshop on Rock Foundation*, Tokyo, Japan, pp. 279-292.
- Farmer, I.W. (1975) Stress Distribution along a Resin Grouted Rock Anchor. *Int. J. Rock Mech, Min. Sci. & Geomech, Abstr.*, Vol. 12, pp. 347-351.
- Hill, K.O. and Meltz, G. (1997) Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. *IEEE J. Lightwave Technology*, Vol 15, No 8, pp. 1263-1276.
- Zhu, H.H., Yin, J.H., Jin, W., and Zhou, W.H. (2007) Soil nail monitoring using Fiber Bragg Grating sensors during pullout tests. *The joint 60th Canadian Geotechnical and 8th IAH-CNC Conferences*, Ottawa, Canada, pp. 249-254.

◎ 논문접수일 : 09년 03월 06일
◎ 심사의뢰일 : 09년 03월 09일
◎ 심사완료일 : 09년 04월 07일