

광섬유 센서를 이용한 앵커의 긴장력 측정 및 관리 기술



김영상

전남대학교 해양토목공학과 부교수
(geoyiskim@jnu.ac.kr)

1. 개요

그라운드 앵커공법은 사면이 자립하여 안정성을 확보하지 못할 경우 가장 널리 사용되는 사면보강공법들 중 하나이나 기존에 사용되는 로드 셀 방식을 제외하고는 도입된 긴장력을 측정하거나 모니터링 할 수 있는 기술개발 사례가 많지 않다. 기존 방법인 전기저항식이나 진동현식 스트레인게이지를 이용한 로드 셀은 앵커 두부에 설치하는 방식으로 이용되고 있다. 그러나 이러한 전기저항식 센서는 특성 상 장기적인 내구성 확보에 어려움이 있고 시공이 불편하며 전기적인 잡음 및 전자기파에 노출 시 측정값의 신뢰성이 급격히 저하되는 특징이 있다(김재민 등, 2007). 전기저항식 및 진동현식 센서들의 이런 단점들을 극복하기 위하여 2000년대 초반부터 다양한 광섬유 센서들이 지반분야에 도입되어 적용되기 시작하였다(이원제 등, 2001; 구호본과 백용, 2001; 김기수, 2007; 김

재민 등, 2007; 김영상 등, 2009; 성현종 등, 2011). 이 노트에서는 지반공학 분야에 적용된 광섬유 센서 기술 중 그림 1과 같이 광섬유 브래그격자(Fiber Bragg Grating; FBG)센서를 7연 강연선의 내부에 삽입하여 고정된 특수한 텐던을 이용하여 앵커의 단기 및 장기 긴장력을 측정, 관리하는 기술에 대하여 기술하였다.

김재민 등(2008)은 광섬유 센서를 설치하기 위한 중앙 튜브의 직경을 1.0 ~ 2.0mm로 변화시키며 응력변

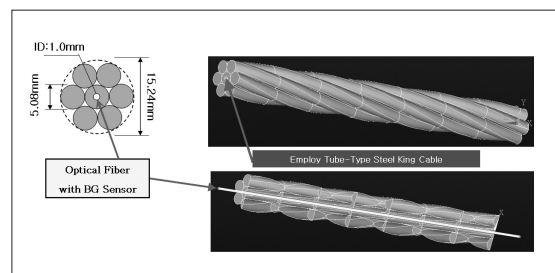
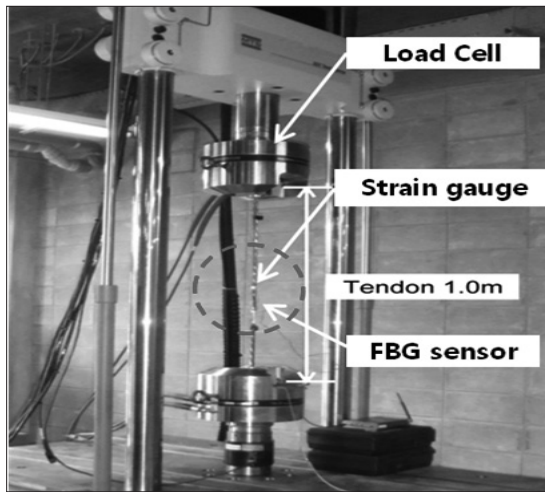


그림 1. 광섬유 센서 내장 텐던의 개념도(김재민 등, 2007)

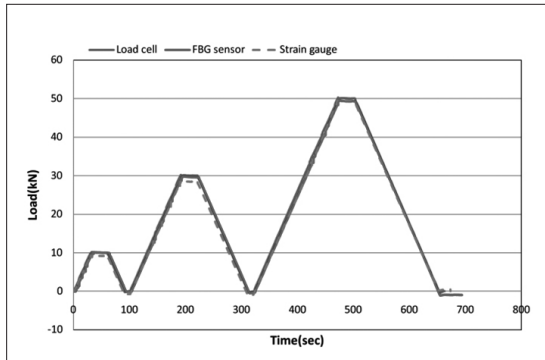
화를 확인한 결과, 기존 강연선의 응력에 비해 3%이상 증가하지 않음을 확인하여 센서 설치를 위한 중공 튜브 사용이 문제되지 않는 것으로 나타났다.

2. 앵커의 단기 긴장력 측정

그림 1과 같이 광섬유 브래그 센서(FBG)를 내부에 고정된 강연선의 센서 성능을 검증하기 위해 1.0m길이의 텐던 시편을 제작하고 그림 2(a)와 같이 UTM장



(a) UTM장비에 설치된 스마트 텐던 시편



(b) 인장실험 결과

그림 2. 1.0m길이 스마트 텐던 시편 성능 검증실험(Kim 등, 2010)

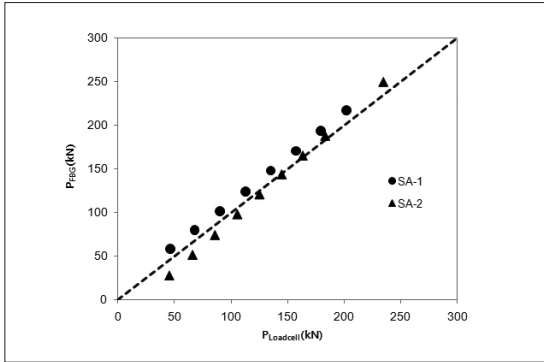
비를 이용하여 인장실험을 수행하였다. 동일한 위치에서 측정된 FBG센서와 스트레인게이지의 변형률로부터 환산된 장력을 UTM 상부에 설치된 로드셀에서 측정된 값과 비교하였다. 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 텐던에 매립된 FBG 센서에서 측정된 긴장력이 로드셀 및 스트레인게이지 측정값과 매우 일치하는 것으로 나타나 센서로서의 성능을 검증하였다.

또한 센서 성능이 검증된 광섬유 센서 내장 텐던을 이용하여 상용 인장형 앵커를 제작하고 인발실험 시 도입 긴장력을 측정하여 고가의 로드 셀의 측정값과 비교하였다(김영상 등, 2009). 정착부 지반조건이 다른 4개의 인장형 앵커에 대한 현장인발실험 중 그라운드 앵커의 긴장력을 측정한 결과, 암반에 정착부가 설치된 현장(SA-1과 SA-2)에서 측정된 긴장력 결과(그림 3(a))에 비해 풍화토 지반에 정착된 현장(SA-3과 SA-4)의 긴장력 측정결과(그림 3(b))가 상대적으로 변동성이 크게 측정되었다. 그러나 두 경우 모두 전체적으로는 앵커 두부에 설치된 고가의 로드 셀에서 측정된 긴장력 값과 매우 일치하여 제안된 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용하여 시공 중 도입 긴장력의 경제적인 관리가 가능함을 확인하였다.

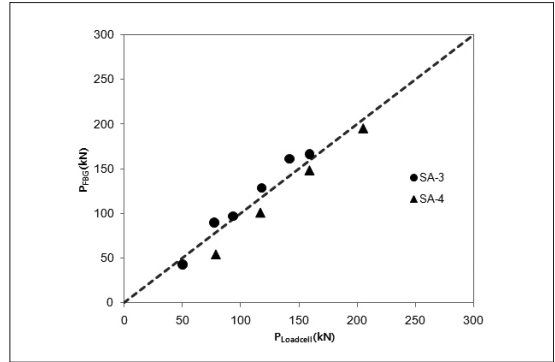
3. 앵커의 장기 긴장력 측정

인발실험과 같이 단기간에 긴장력을 측정하는 경우와 달리 장기간 동안 그라운드 앵커의 장력을 모니터링 하기 위해서는 앵커 내에 설치되는 광섬유 센서의 위치가 매우 중요하다. 이는 인장형 앵커의 긴장력을 측정하기 위해서는 약 2.0m~3.0m 깊이의 자유장부에 광섬유 센서를 설치하기 때문으로 계절에 따른 지중온도의 변화가 작지 않아 이에 대한 보상을 실시하여야 한다. 식(1)은 변형률 변화와 온도변화에 대하여 반응하는 반사파장의 변화량 관계식이다.

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



(a) 풍화암 정착 인장형 앵커



(b) 풍화토 정착 인장형 앵커

그림 3. 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용한 앵커의 단기 긴장력 측정 사례(김영상 등, 2009)

여기서 α 는 온도 팽창계수(실리카: $0.51 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), ξ 는 열 광학계수($5.76 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), P_e 는 광탄성 상수(0.22), $\Delta\varepsilon$ 는 광섬유 격자의 변형률 변화량, ΔT 는 광섬유 격자의 온도 변화량이다. 이때 광섬유 센서 내장형 텐던을 이용하여 단기간에 현장인발실험을 통해 그라운드 앵커의 장력을 측정하는 경우에는, 온도변화량을 무시하고($\Delta T=0$) 식(1)을 다음 식(2)와 같이 반사파장의 변화량($\Delta\lambda_B$)으로부터 변형률의 변화량($\Delta\varepsilon$)을 알 수 있도록 간단히 정리할 수 있으며 그림 3 사례의 경우이다.

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

그러나 장기간에 걸쳐 그라운드 앵커의 장력을 측정하는 경우에는 식(1)에서 광섬유 센서의 온도반응계수 $\beta(=\alpha+\xi)$ 를 포함하여 식(3)과 같이 정리할 수 있다. 이때 우변 두 번째 항은 온도변화에 의한 변형률 보정 항이다.

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

성현종 등(2011)은 실내실험을 통하여 온도변화(ΔT)와 광섬유 센서의 반사파장 변화량($\Delta\lambda_B/\lambda_B$)의 관계

로부터 광섬유 센서 내장형 텐던의 온도반응계수(β)를 $2.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 로 결정하였다. 전남대학교 부지 내에 설치하여 1년 이상의 장기간 동안 모니터링 된 앵커의 긴장력 변화와 대기온도 및 지중온도 측정결과가 그림 4에 나타나 있다. 계절별 장력모니터링을 수행하는 동안 같은 시기에 측정된 기상청 자료에 의하면 대기온도는 $-2.2 \sim 24.2^{\circ}\text{C}$ 범위에서 변화하였고 G.L-2.0m에서 측정된 지중온도는 $12.4 \sim 20.6^{\circ}\text{C}$ 범위로 조사되었다. 지중온도가 대기온도에 비해 상대적으로 작은 범위의 온도변화를 나타내지만 무시할 수 없는 정도이므로($\Delta T \neq 0$) 성현종 등(2011)이 제안한 광섬유 센서 내장형 텐던의 온도반응계수 β 를 이용하여 식(3)으로부터 지중온도 변화에 의한 변형률 변화를 제거하는

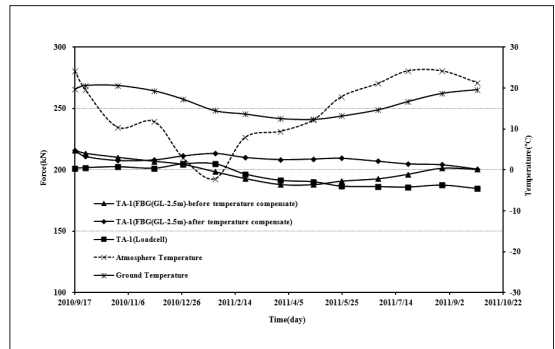


그림 4. 인장형 앵커 긴장력의 장기 모니터링 사례

보상을 실시하고 같은 그림에 도시하였다. 온도보상 전 광섬유 센서 내장형 텐던의 긴장력 값은 지중온도 변화와 유사하게 계절변화에 따라 증가와 감소를 반복하여 지중온도의 영향을 직접적으로 받고 있음을 알 수 있다. 그러나 지중온도 변화(ΔT)에 의한 광섬유 센서의 파장변화를 보정한 긴장력 값은 초기 긴장력 도입 후 지중온도 변화와 큰 상관없이 일관성 있는 결과를 나타내며 로드 셀과도 유사한 결과를 주고 있다. 온도 보상된 광섬유 센서 내장형 텐던은 매우 경제적인 뿐 아니라 내구성 있게 신뢰성 있는 긴장력 측정 및 관리가능함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. Kim, J.M., Kim, H.W. and Kim, Y.S. (2010) Tension Monitoring of a prestressing strand for concrete bridge using tendon FBG sensors, IABMAS 2010, Philadelphia, Pennsylvania, USA, pp. 205~210.
2. 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.
3. 구호본, 백용 (2001) 광섬유 센서를 이용한 산사태 계측기법 개발, 한국건설기술연구원.
4. 김기수 (2007) 광섬유 센서를 이용한 사회기반시설 구조물의 스마트 모니터링 기법, 미래의 토목공학, 대한토목학회 자연과 문명의 조화, 55(4), PP.81~91.
5. 김영상, 서동남, 김재민, 성현중 (2009) FBG 센서가 내장된 스마트 텐던을 이용한 7연 강연선의 인발 하중전이 특성, 한국방재학회 논문집, 9(5), pp.79~86.
6. 김재민, 김영상, 김현우, 서동남, 윤정방 (2007) FBG 센서를 내장한 스마트 강연선 개발, 한국전산구조공학회 논문집, 20(2), pp.33~38.
7. 성현중, 김영상, 김재민, 박귀현 (2011) 광섬유 센서를 이용한 인장형 그라운드 앵커의 장력측정, 한국지반공학회 논문집, 27(6), pp.17~26.
8. 이원제, 김대규, 이우진 (2001) 광섬유 격자센서를 이용한 매입말뚝의 하중전이 측정, 대한토목학회 논문집, 21(3-C), pp.311~319.