

광섬유 센서를 이용한 인장형 그라운드 앵커의 장력측정

Tension Force Monitoring of Tension Type Ground Anchor Using Optical FBG Sensors

성 현 중¹ Sung, Hyun-Jong

김 영 상² Kim, Young-Sang

김 재 민³ Kim, Jae-Min

박 귀 현⁴ Park, Gui-Hyun

Abstract

Ground anchor method is one of the most popular reinforcing technology in Korea. For the sound monitoring of slope reinforced by permanent anchor for a long period, monitoring the tension force of ground anchor is very important. However, special technology except conventional load cell has not been developed for this purpose. In this paper, a new method is described to replace the conventional strain gauge and V.W. type load cell which has been commonly used as a prestress force monitoring tool for a short-term and long-term. Four 11.5 m long strain detectable tension type anchors were made using FBG sensor embedded tendon since FBG sensor is smaller than strain gauge type load cell and does not have noise from electromagnetic wave. Each two set strain detectable tension type anchors were installed into the different ground conditions, i.e., soft rock and weathered granite soil. Prestress force of ground anchor was monitored during the loading-unloading step from in-situ pullout test using proposed FBG sensor embedded in the tendon and the conventional load cell. Test results show that the prestress force monitored from FBG sensor may well be used practically, for it almost matches with that measured from expensive load cell.

요 지

그라운드 앵커공법은 현재 우리나라에서 가장 일반적으로 사용되는 사면보강공법들 중 하나이다. 그러므로 앵커로 보강된 사면의 안정성을 장기간 확인하기 위해서는 그라운드 앵커의 긴장력을 측정하는 것이 매우 중요하다. 그러나 전통적인 로드 셀 방식의 측정기술을 제외하고는 특별한 기술이 개발된 것이 없다. 본 논문에서는 지반구조물의 보강을 위해 널리 사용되는 그라운드 앵커의 단기 및 장기 장력을 측정하기 위해 기존에 현장에서 주로 사용되는 스트레인게이지 또는 V/W 타입 로드 셀을 대체할 수 있는 새로운 방법에 대하여 기술하였다. 사용된 센서는 스트레인게이지 또는 V/W 타입의 센서에 비해 크기가 작고 내구성이 우수하며 전자기파에 의한 노이즈 발생이 없는 광섬유 브래그격자(Fiber Bragg Grating ; FBG)센서이다. FBG 센서를 내장한 7연 강연선을 이용하여 원하는 위치에서 변형을 감지가 가능한 인장형 앵커를 제작하고 앵커 정착장을 연암과 화강풍화토 지반조건에 각각 2세트(set)씩 시공하여 현장인발실험을 수행하였다. 재하-제하단계를 포함하는 전 하중단계에서 FBG센서로 측정된 변형률로부터 장력 모니터링을 수행하였고 기존 로드 셀로 측정된 결과와 비교하였다. 현장 인발실험 결과, 제안된 광섬유 센서를 이용한 그라운드 앵커의 시공 중 긴장력 측정결과 실내 UTM 결과와 달리 약간의 차이가 있으나 실용적인 차원에서는 충분히 활용 가능한 것으로 확인되었다.

Keywords : FBG sensor, Tendon, Ground anchor, Long-term monitoring, Short-term monitoring

1 정회원, 전남대학교 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., geoyoungkim@jnu.ac.kr, 교신저자)

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

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

7연-강연선은 쓰일앵커 및 락앵커와 같은 지반보강재에 많이 적용되고 있음에도 불구하고 현재까지는 개별 강연선의 장력을 직접 측정하는 정확하고 간단한 방법이 없었다. 또한 흙막이 굴착 및 절취사면의 보강공법으로 많이 적용되고 있는 앵커의 장력을 측정하는 전기저항식 로드셀과 스트레인지이지, 바이브레이팅 와이어(vibrating wire) 타입의 현재 모니터링 방법은 앵커를 구성하는 다수의 강연선의 전체적인 장력을 측정할 뿐 아니라, 전기저항식 센서의 경우 자기열화에 의하여 안전관리를 위한 장기적인 모니터링에 한계를 가지고 있다. 따라서 이를 개선할 수 있는 방안으로 광섬유 센서를 이용하여 강연선의 변형률을 측정할 수 있는 스마트 텐던을 개발하여 다양한 기초실험과 앵커적용을 위한 실내실험을 실시하였고 그 적용 가능성을 확인한 바 있다(김재민 등, 2007; 김영상 등, 2008). 본 연구에서 사용된 광섬유 내장형 텐던은 강연선의 중앙케이블을 중공케이블로 대체하고, 그 내부에 Bragg격자 센서가 새겨진 광섬유를 삽입하여 고정함으로써 강연선의 변형률을 측정할 수 있도록 개발한 특수한 형태의 강연선이다(김재민 등, 2007).

본 연구에서는 광섬유 내장형 텐던을 이용하여 실제 그라운드 앵커의 장력 측정 가능성 및 정확성을 확인하기 위해 11.5m 길이의 실험형 인장형 앵커(prototype tension type anchor)를 제작하였고 연암 및 화강풍화토 지반조건에 각각 시공하여 현장인발실험을 수행하였다. 현장인발실험 시 재하-제하단계에서 앵커 자유장에 위치한 FBG센서로부터 측정된 반사파장의 변화에 의해 장력 모니터링을 수행하였으며 앵커 두부(head)에 설치한 V/W 타입의 로드셀에 의한 장력 측정결과와 비교하였다.

2. 지반보강재의 장력모니터링 사례

그라운드 앵커는 가해진 긴장력에 의해 굴착면 및 사면의 안정성을 유지하는 지반 보강재이므로 초기에 도입된 긴장력이 정확히 가해지고 유지되는 것이 매우 중요하다. 그러나 사용중 앵커 긴장력 측정법은 마땅히 없으며 Lift-off법에 의해 긴장력 풀림을 측정하고 있는 것이 일반적인 현실이다. 국내외에서 앵커와 네일에 대한 긴장력 및 하중전달 모니터링이 수행된 사례를 정리하였다.

Liew 등(2003)은 도심지 대규모 굴착 현장에서 토류벽의 보강을 위하여 사용되는 일반적인 그라운드 앵커와 긴장력 손실을 줄이기 위하여 특수하게 고안된 샤프트 형태의 잭앵커의 장력측정 결과를 비교하였다. 앵커의 긴장력 변화를 비교하기 위해 앵커두부에 로드셀을 설치하였으며, 측정결과 특수하게 고안된 잭앵커에서 더 적은 긴장력 손실을 나타내는 것을 확인한 바 있다. Moerman 등(2005)은 V/W타입의 기존 로드 셀 표면에 FBG센서를 부착하여 제작된 특수한 로드셀을 이용하여 재하실험을 통해 그라운드 앵커의 장력을 측정하였다. 장력 모니터링 결과, 앵커 두부의 유압잭에 의해 가해진 장력과 FBG타입 로드 셀에 의해 측정된 앵커 긴장력은 거의 일치하였다. Hsu 등(2007)은 자갈층에서 그라운드 앵커의 거동을 살펴보기 위해 실제 현장에 앵커 종류별(인장형, 압축형, 복합형앵커) 및 심도별로 수직 천공후 설치하여 인발실험을 수행하였다. 하중은 재하(loading)-제하(unloading)순으로 극한인발하중까지 재하 하였으며 가해진 하중과 변위량은 앵커 두부에 위치한 로드 셀 및 변위계에 의해 측정되었다. 실험결과 자갈층에서의 앵커 종류별 극한하중 및 지반파괴 범위가 측정되었다. 국내에서는 임성순과 이대수(1999) 및 홍원표 등(2004)이 앵커 두부에 로드셀을 이용하여 흙막이 지보공으로 설치된 어스앵커의 초기 앵커축력과 인장력 변화량을 측정한 바 있다. 김낙경(2001)은 스트레인지이지와 매립형게이지를 이용하여 풍화토 지반에 설치된 인장형 앵커와 압축형 앵커의 그라우트와 강연선의 하중전이 분포를 측정한 바 있다. 김래현 등(2002)은 유압잭 게이지, 디지털 재로드 계측기, 로드 셀을 이용한 현장인발실험을 통해 그라운드 앵커의 크리프 및 단기거동 특성을 확인한 바 있다. 홍석우(2002)는 앵커 두부에 로드 셀 및 변위계, 그라우트체에 변형률게이지를 설치하여 압축형 앵커의 인발거동을 확인한 바 있다. 김명만 등(2004)은 하중분산 압축형 앵커의 내하체 위치 주변에 매립형게이지를 설치하여 하중분산 효과를 확인하였으며 실험중 작용 인장하중과 앵커 두부 변위는 각각 로드 셀과 변위계(LVDT)를 이용하여 측정한 바 있다. 전상수 등(2008)은 단일철근 형태의 네일과 다철근 네일에 전기저항식 변형률계를 부착하여 네일 두부에 작용하는 인발하중에 의한 네일 심도별 하중전이를 측정한 바 있다. 허병주 등(2010)은 부력저항 영구앵커의 두부에 로드 셀을 설치하여 시간경과에 따른 앵커의 장기거동을 측정한 바 있다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 현재까지는 강연선 또는 강봉을 이용하는 그라운드 앵커와 네일의 단기 장력 측정에는 앵커나 네일의 두부(head)에 설치되는 전기저항식 로드 셀이 비교적 성공적으로 적용될 수 있다. 그러나 알려진 바와 같이 전기저항식 로드 셀은 특별한 경우를 제외하면 불과 수년 이상의 수명을 기대할 수 없으며 연구사면과 같이 장기적인 관리가 필요한 경우에는 적용에 한계가 있다. 또한 이를 극복하기 위해 Moerman 등에 의해 개발된 FBG타입 로드 셀은 장기 모니터링에 적합하게 활용될 수 있으나 로드 셀 형태의 장력 측정법으로는 앵커를 구성하는 전체 강연선의 장력 변화만을 측정할 수 있을 뿐 개별 텐던에 발생하는 미세한 변화는 감지할 수 없다.

3. 광섬유 센서를 이용한 7연 강연선의 변형률 측정 원리 및 검증

3.1 스마트 텐던의 개념

그림 1은 FBG센서의 구조 및 측정원리를 나타내며 광대역의 스펙트럼(broadband light source)을 광섬유에 입사시킬 경우 브래그 조건식($\lambda_B = 2n\Lambda$, n =광섬유의 굴절률, Λ =Bragg격자의 간격)에 만족하는 파장 성분(λ_B)만이 광섬유 격자에서 반사(reflected light)되며 나머지 파장 성분은 그대로 통과(transmitted light)하여 광 스펙

트럼 분석기(interrogator)에 나타난다. 만일 FBG에 온도나 압력 등의 외부 물리량이 가해질 경우 브래그의 간격(Λ)이 변화하여 결국 반사되는 파장(λ_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 α 는 온도 팽창계수(실리카: $0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), ξ 는 열 광학계수($8.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), P_e 는 광탄성 상수(0.22), $\Delta\varepsilon$ 은 광섬유 격자의 변형률 변화량, ΔT 는 광섬유 격자의 온도 변화량이다. 이때 본 연구에서 적용되는 광섬유 센서가 내장된 스마트 텐던은 단기간에 현장인발실험을 통해 그라운드 앵커의 장력을 측정 하므로 온도 변화에 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.

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

한편 일정 간격의 Bragg를 갖는 광섬유 센서가 내장

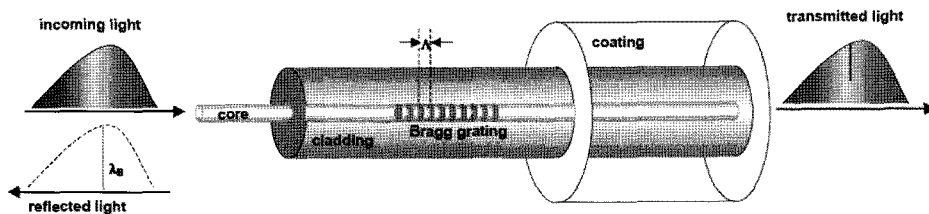


그림 1. FBG센서의 구조 및 측정원리

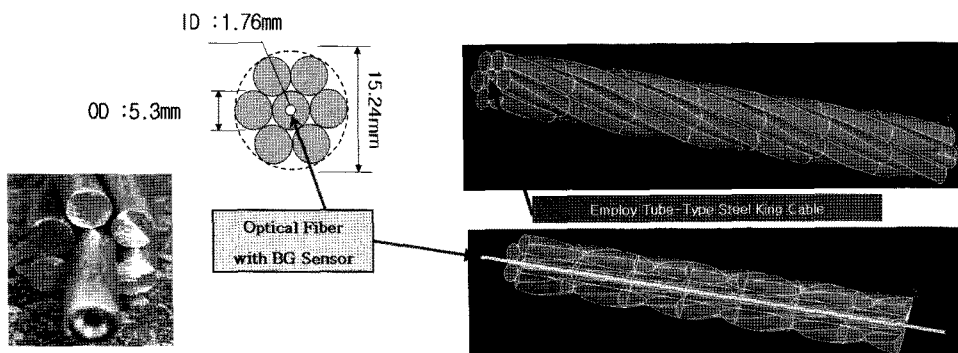
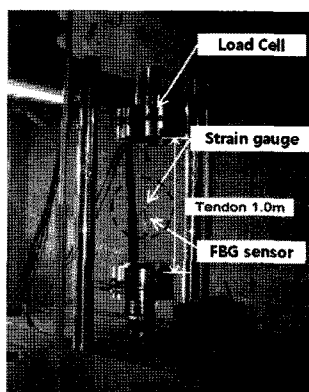


그림 2. 스마트 텐던의 개념도

된 스마트 텐던은 그림 2와 같다. 강연선의 중앙 킹케이블을 중공 강제 튜브(φ1.0~2.0mm)로 교체한 후 튜브 내부에 광섬유 센서를 삽입하고 접착제(폴리에스터레진+경화제)를 주입하여 케이블과 일체가 되도록 한다(김재민 등, 2007). 김재민 등(2007)과 김영상 등(2008)은 FBG센서가 삽입되어 접착제로 접착되어 있는 중공 강제 튜브에 대한 성능실험을 통해 FBG센서의 중공 강제 튜브와 일체화 및 센서로서의 기능을 검증하였다. 한편, 광섬유 센서의 특성상 다중점 측정이 가능하므로 원하는 위치에서 Bragg센서의 변화를 측정하면 앵커의 장력뿐 아니라 앵커의 하중전이 측정도 가능하다(김영상 등, 2009).

3.2 스마트 텐던의 변형을 측정 성능검증

Kim 등(2010)은 스마트 텐던의 성능을 검증하기 위해 1.0m길이의 스마트 텐던 시편을 제작하였고 그림 3(a)와 같이 UTM장비를 이용하여 인장실험을 수행하였다. 스마트 텐던에 내장된 FBG센서의 변형을 측정값을 비교하기 위해 FBG센서와 같은 위치의 스마트 텐던 외부에 스트레인게이지를 부착하였으며 그림 3(b)와 같이 50kN까지 반복적으로 재하-제하하여 인장실험을 수행하였다. FBG센서와 스트레인게이지의 변형률로부터 환산된 장력은 UTM 상부에 설치된 로드 셀에서 측정된 값과 비교하였으며 그림에 나타난 바와 같이 제안된 방식의 텐던에 매립된 FBG 센서가 로드 셀 및 스트레인게이지와 매우 일치하는 것으로 나타났다.



(a) UTM장비에 설치된 스마트 텐던 시편

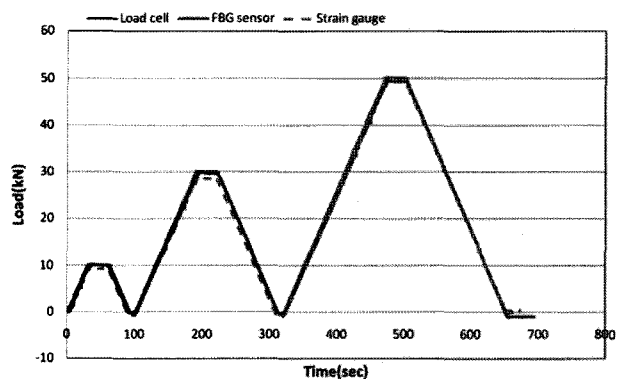
4. 광섬유 센서를 이용한 그라운드 앵커의 장력 측정사례

4.1 변형을 측정이 가능한 인장형 앵커 제작

FBG센서 내장형 텐던을 이용한 실대형 그라운드 앵커의 장력 측정 가능성 및 정확성 평가를 위해 제안된 텐던을 포함시켜 11.5m 길이의 변형을 측정이 가능한 인장형 앵커를 제작하였다. 연구에 사용된 인장형 앵커는 사면 및 토류벽 보강에 일반적으로 적용되고 있는 상용제품으로 보통 4~5가닥의 강연선으로 구성되며, 본 연구에서는 연구실에서 제작된 FBG 센서 내장형 텐던과 상용제품의 일부 텐던을 교체함으로써 변형을 측정이 가능한 인장형 앵커를 간단히 제작할 수 있다. 한편 앵커 제작 및 설치 그리고 인발실험 과정에서 삽입된 광섬유 센서 연결부의 손상을 방지하기 위해 특별히 고안된 두부보호장치(head protection)를 설치하였다.

광섬유 센서 위치에 따라 앵커의 자유장 및 정착장에서 장력모니터링을 수행하기 위해서 그림 5와 같이 FBG 센서를 배치하였으며 센서의 초기 반사파장이 표 1에 정리되어 있다. 인장형 앵커(SA-1~4)는 긴장력을 주변 지반에 전달하기 위해 시멘트 그라우트로 주변지반과 완전히 정착된 정착부와 정착되지 않은 자유장으로 구분되는 구조이다. 자유장에는 앵커 두부에 가해진 긴장력이 마찰없이 전달되므로 인발실험 중 첫 번째 FBG센서(FBG1)에서 측정된 반사파장의 변화로부터 식 (3)을 이용하여 앵커의 긴장력을 간단히 산정할 수 있다.

$$P_{FBG} = A_f \times E_f \times \epsilon_{FBG} \times n \quad (3)$$

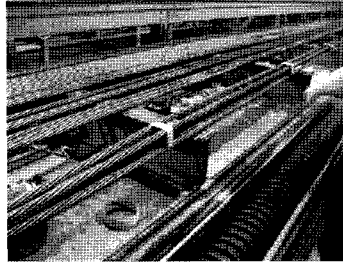


(b) 인장실험 결과

그림 3. 1.0m길이 스마트 텐던 시편 성능 검증실험(Kim 등, 2010)



(a) 쉬스관 삽입



(b) 앵커조립



(c) 간격재 고정

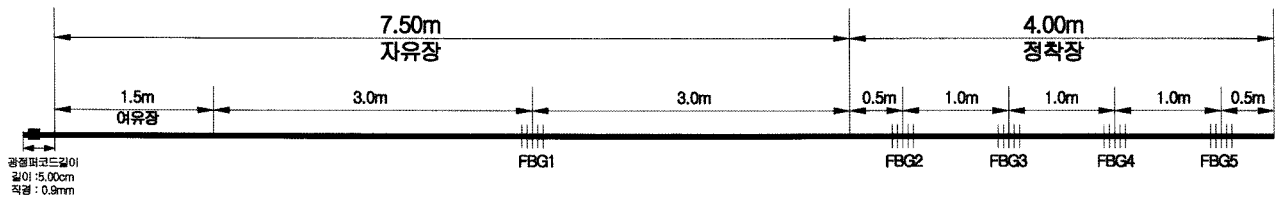


(d) FBG센서 확인

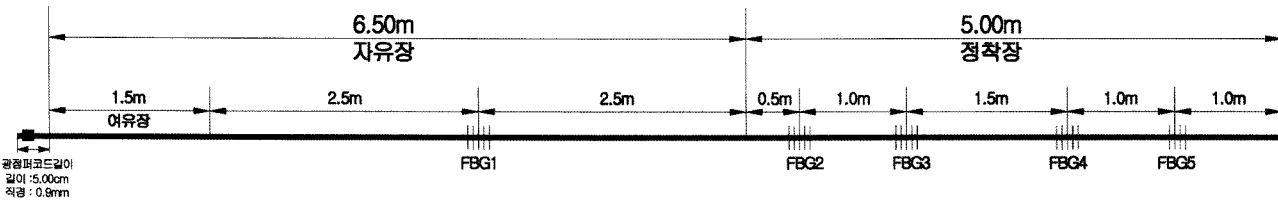


(e) 인장형 앵커 완성품

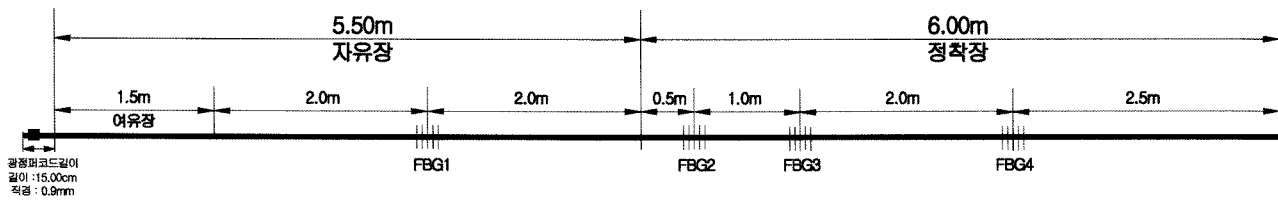
그림 4. 변형률 측정이 가능한 앵커 완성품 제작과정



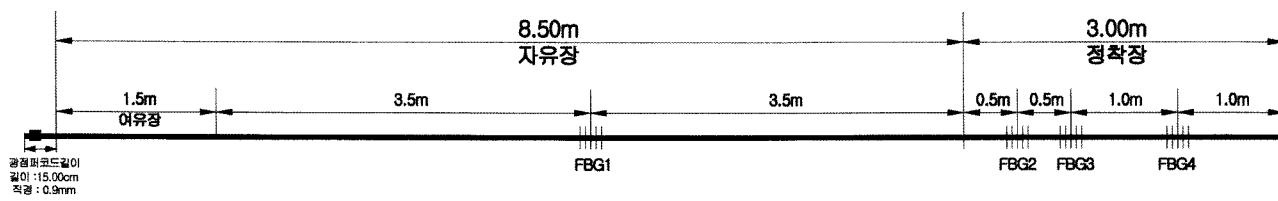
(a) SA-1



(b) SA-2



(c) SA-3



(d) SA-4

그림 5. 실대형의 변형률 감지앵커에서 FBG센서 배치도

표 1. 앵커 자유장부에 배치된 FBG1 센서의 초기파장 및 위치

구분 (No.)	초기파장 λ_B (nm)	센서위치 GL(-)m	FBG센서		용도	앵커종류
			길이(mm)	직경(mm)		
SA-1	1524.4585	3.0	20	0.125	장력측정	인장형
SA-2	1528.6077	2.5	20	0.125	장력측정	인장형
SA-3	1525.9455	2.0	20	0.125	장력측정	인장형
SA-4	1526.1490	3.5	20	0.125	장력측정	인장형

여기서, P_{FBG} : 스마트 텐던에 작용하는 긴장력 추정 값(kN)

E_t : 텐던의 탄성계수(= 200GPa)

A_t : 텐던의 단면적(= 140mm²)

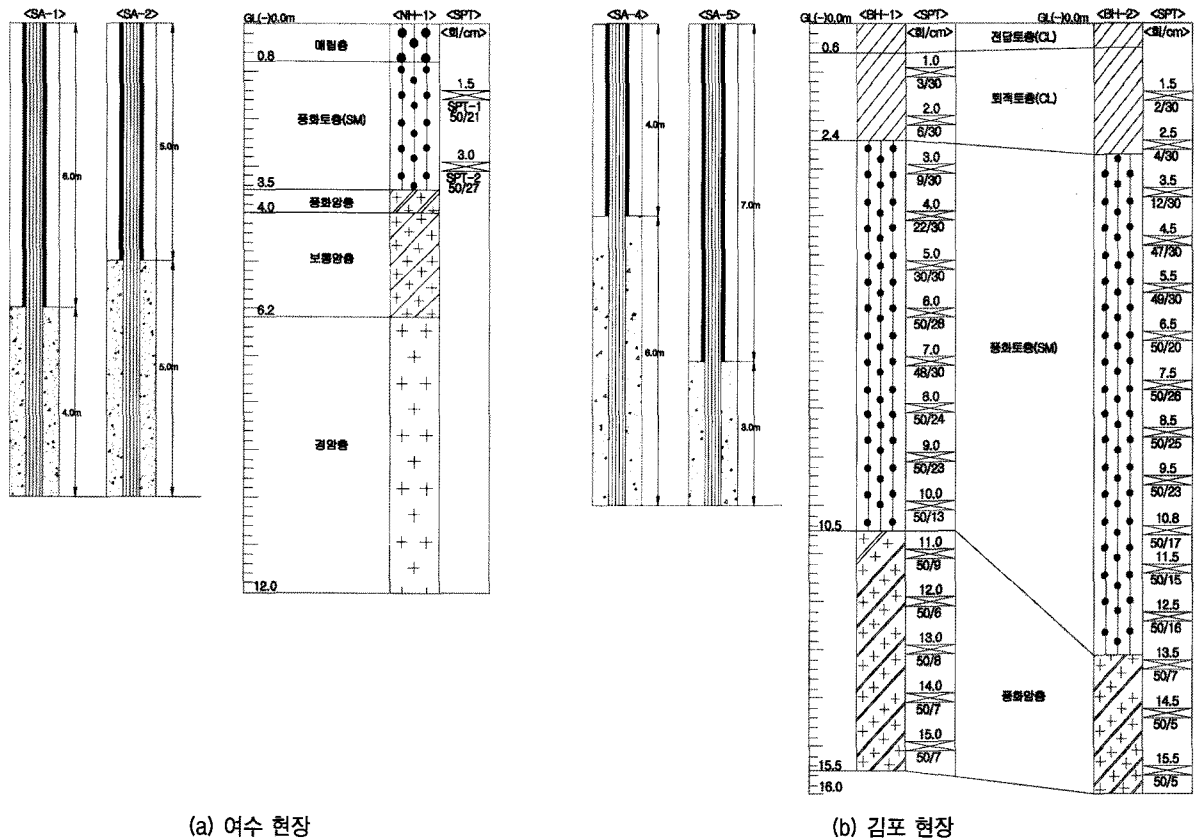
ϵ_{FBG} : FBG센서에서 측정된 파장변화로부터 식 (2)로 산정된 변형률

n : 텐던 가닥수

이때 UTM을 이용한 기초실험 결과, 증공튜브를 포함하는 7연 강연선의 항복강도는 감소하나 탄성계수는 원래 강선과 큰 차이가 없는 것으로 확인되어 일반적인 강연선의 값을 사용하였다.

4.2 현장인발실험 및 지반조건

광섬유 센서를 이용한 그라운드 앵커의 장력 측정 성능 평가를 위한 현장인발실험은 전남대학교 해양환경 시뮬레이션 실험시설 건설공사 현장(여수)과 OO공장 부지(김포)에서 수행하였다. 실험이 수행된 현장의 지반구성은 그림 6과 같으며 앵커길이, 설계조건 및 정착장 부분의 지반조건은 표 2에 정리되어 있다. SA-1과 2는 경암층에 정착장이 설치되었으며, SA-3와 4는 풍화토층에 설치되었다. 그라운드 앵커는 로타리 타입의 드릴오거로 105mm 직경으로 천공 후 현장 원지반에 설치되었고 무가압으로 그라우트 되었다. 그라우트 후 약 30일이 지난 후에 현장인발실험을 실시하였으며 사



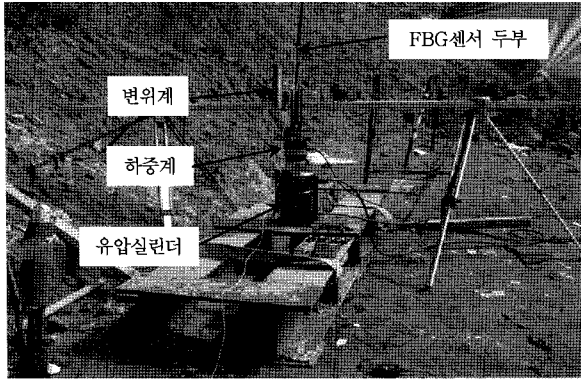
(a) 여수 현장

(b) 김포 현장

그림 6. 현장인발실험 현장 지반구성

표 2. 현장인발실험을 위해 설치된 실대형 앵커의 길이, 설계조건 및 정착부 지반조건

구분 (No.)	앵커길이 (m)	천공장 (m)	자유장 (m)	정착장 (m)	천공경 (mm)	구성 강연선 수 (가닥)	지반조건	비고
SA-1	11.5	10.5	7.5	4.0	105	4	암반	여수
SA-2	11.5	10.5	6.5	5.0	105	5		
SA-3	11.5	10.0	5.5	6.0	105	4	화강풍화토	김포
SA-4	11.5	10.0	8.5	3.0	105	4		

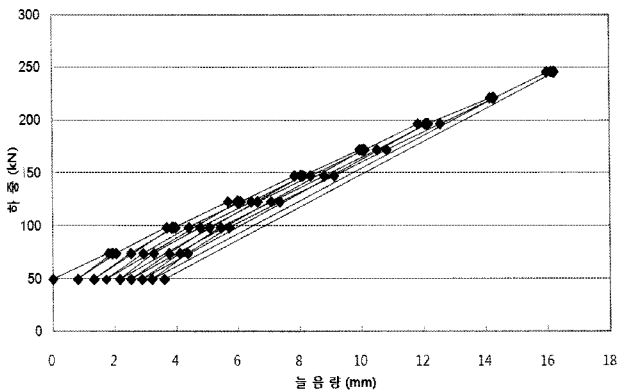


(a) 여수 현장

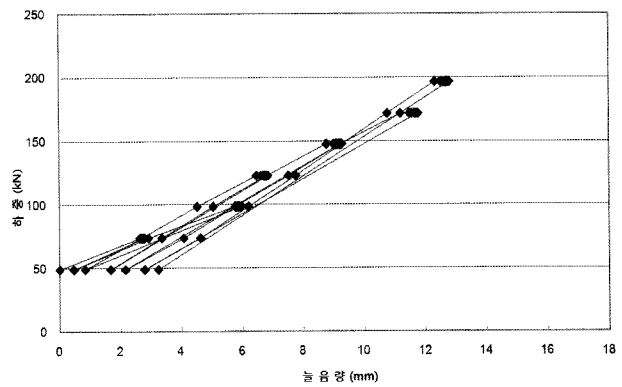


(b) 김포 현장

그림 7. 그라운드 앵커의 현장인발실험 현장사진



(a) 여수 현장



(b) 김포 현장

그림 8. 현장인발실험 하중재하 방법

용된 그라우트의 물-시멘트 비는 45%이고 28일 압축강도는 20.6Mpa이다.

현장인발실험을 위해 사용된 인발장비 및 계측장비는 그림 7과 같이 유압펌프, 하중계(Load Cell), 변위계(LVDT), 인터로게이터(MICRON OPTICS SM130)등이다.

현장인발실험은 AASHTO(FHWA-IF-99-015)기준에 따라 앵커의 설계하중인 196.14~245.2kN까지 재하(Load)와 제하(Unloading)를 반복하여 수행하였으며 하중이력 곡선이 그림 8에 도시되어 있다. 스마트 텐던에 의해 측정된 긴장력과 비교를 위해 앵커 두부에 정밀한 하중계(Load Cell)를 설치하였으며 변위계(LVDT)를 설치하여

긴장력 도입에 따른 두부 변위를 측정하였다.

4.3 현장인발실험 중 광섬유 센서를 이용한 그라운드 앵커의 장력측정 결과

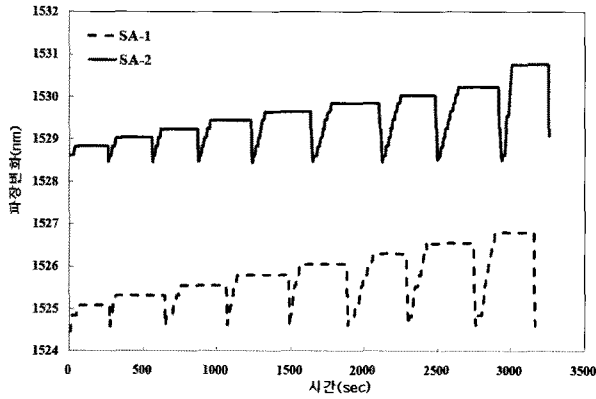
현장인발실험시 그라운드 앵커에 긴장력을 가하는 동안 각 앵커의 자유장에 배치된 첫 번째 FBG센서들로부터 측정된 파장변화 결과는 그림 9와 같다. 각각의 FBG 센서들은 서로 다른 초기 반사파장(λ_B)을 가지고 있으며 그림 8과 같은 하중이력(loading history)에 따라 긴장력을 가하는 동안 시간에 따른 반사파장의 변화가 명

확하게 나타났다.

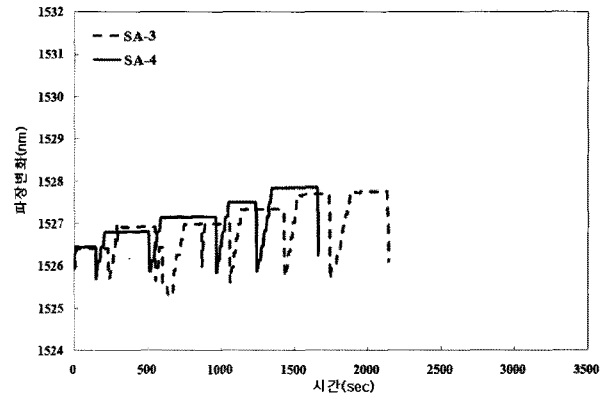
그림 9와 같이 각각의 하중 단계에서 앵커의 자유장에 배치된 FBG센서로부터 측정된 파장변화($\Delta\lambda_B$)는 식 (2)를 이용하여 변형률(ϵ_{FBG})로 변환되고 식 (3)을 이용

하여 긴장력을 산정하였다.

ϵ_{FBG} 에서 산정된 긴장력(P_{FBG})값과 앵커 두부의 로드셀에서 측정된 긴장력($P_{Loadcell}$)값을 비교한 결과가 그림 10에 나타나 있다.

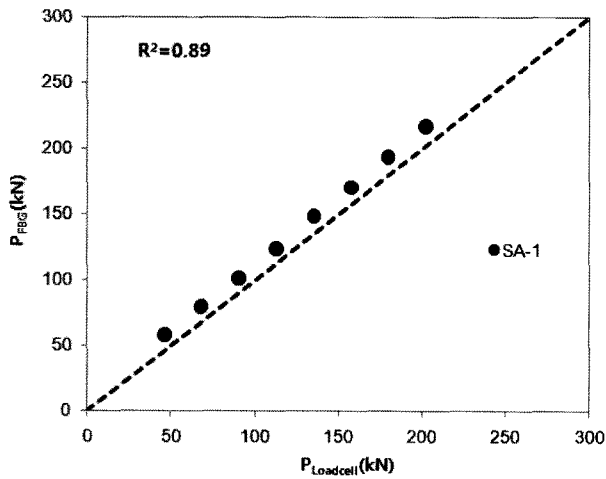


(a) 여수 현장

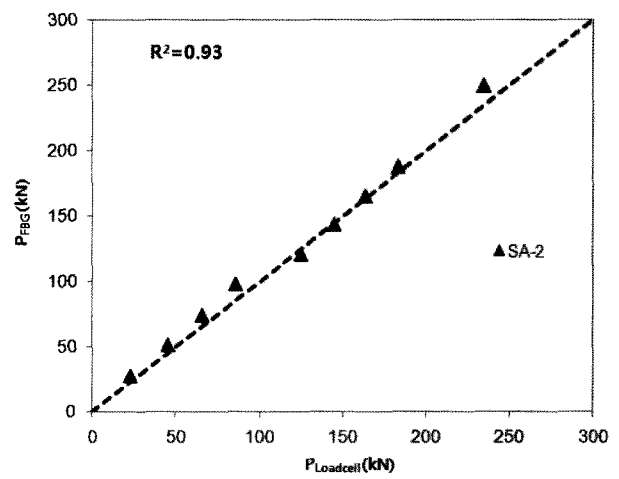


(b) 김포 현장

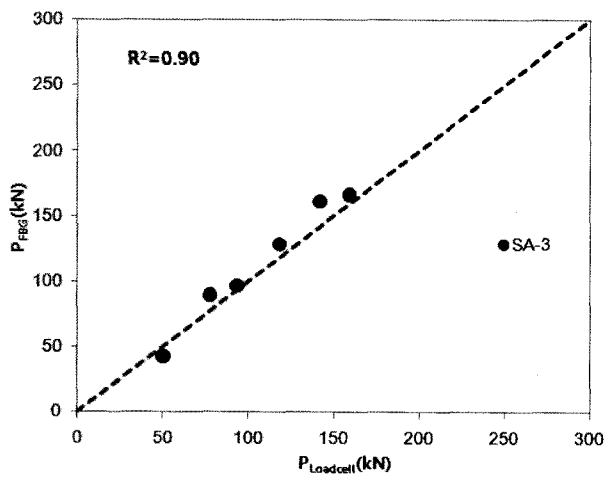
그림 9. 스마트 텐데에 내장된 FBG센서로부터 측정된 파장변화



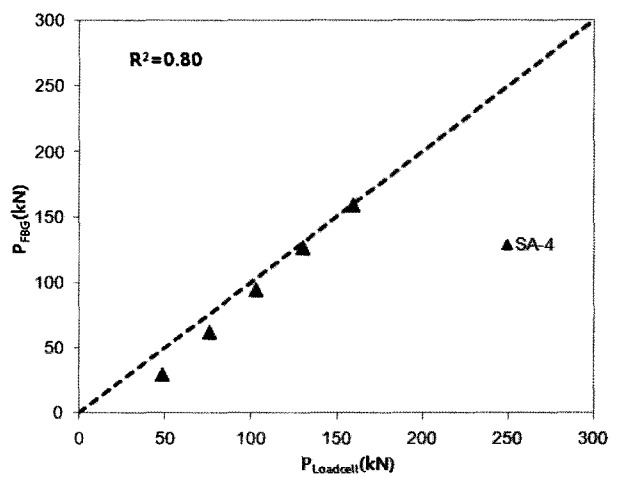
(a) SA-1(여수현장)



(b) SA-2(여수현장)



(c) SA-3(김포현장)



(d) SA-4(김포현장)

그림 10. 로드 셀과 FBG센서에서 측정된 긴장력 비교

광섬유 센서를 이용하여 현장인발실험 중 그라운드 앵커의 긴장력을 측정하여 앵커두부에서 도입된 긴장력과 FBG센서 측정 긴장력을 비교한 결과, 앵커의 전단강도가 큰 암반에 정착부가 설치된 여수 현장에서 측정된 앵커의 극한 인발력이 토사지반에 정착된 김포 현장에서 측정된 극한 인발력 측정결과에 비해 상대적으로 변동성이 작고 정확도가 높게 측정되었다. 그러나 토사지반에서 측정된 경우에도 전반적으로 앵커 두부에 설치된 고가의 로드 셀에서 측정된 긴장력값에 근접하는 경향을 나타내어 광섬유 센서를 이용한 인장형 앵커의 긴장력 측정성능이 실용적으로 충분히 사용할 것으로 판단된다.

한편 SA-1, 2, 3, 4의 비교결과 로드셀과 광섬유센서의 측정 긴장력에 차이가 발생한 원인에 대한 검토결과는 다음과 같다. 먼저 현장인발실험 시 긴장력 도입은 수동식 유압장비에 의해 이루어지며 각 하중단계에서 목표 하중을 도입하더라도 현장지반의 특성과 지속적인 변형으로 인한 긴장력 감소로 하중을 재도입하는 과정이 반복되어 재하 단계별로 로드 셀 및 FBG센서에서 변동폭이 있는 긴장력이 측정된다. 그림 10에 나타난 결과는 이러한 변동폭이 있는 긴장력 측정자료를 전체적으로 평균한 값이므로 로드 셀과 FBG센서 측정 결과값에 차이가 발생할 수 있다. 그러나 이러한 측정결과의 차이가 광섬유센서 자체의 측정 정밀도를 의미하지는 않으며 광섬유 센서를 이용한 긴장력의 측정성능은 그림 3에 나타난 바와 같이 매우 정밀한 것으로 사료된다.

한편 또 다른 원인으로, 스마트 텐던을 제작하는 7연 강연선은 중앙에 직선형 중공케이블을 6가닥의 나선형 케이블이 감고 있는 형상으로 초기에 하중을 도입하는 과정에서 나선형 강선들이 중앙 케이블과 완전히 밀착할 때 약간의 차이가 발생할 수 있다. 따라서 로드셀과 같이 외부에서 전체 강연선의 하중을 측정하는 것과 중앙 케이블에서 변형을 측정하는 FBG센서 시스템과 하중재하 초기에 약간의 차이가 발생할 수 있으며 이는 SA-4에서 나타난 바와 같이 하중단계가 높아지면 자연스럽게 없어진다.

본 논문에서 제안된 방법은 단지 긴장력 도입과정에서만 장력 측정이 가능한 것이 아니라, 센서의 특성상 내구성이 뛰어나므로 설치 후 장기간에 걸친 긴장력 변화 모니터링이 가능할 것으로 기대된다. 단, 장기간 장력 모니터링의 경우에는 지중에 위치한 앵커의 장력 모니터링용 스마트 텐던 외에 별도로 온도 측정용 광섬유

센서를 지중에 매설하고 장기간의 온도변화(ΔT)를 측정하여 그 변화량이 큰 경우에는 식 (1)의 광섬유 센서 반사파장 변화량 산정식에서 온도변화(ΔT)의 영향을 보상하여야 정확한 긴장력을 측정할 수 있다.

5. 결론

앵커나 교량 등 다양한 토목 분야에서 활용되고 있는 7연 강연선에 광섬유 브래그 격자 센서를 내장하여 개발된 스마트 텐던을 이용하여 현장인발실험 중 그라운드 앵커의 장력 측정에 대한 연구를 수행하였다. 연구 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) FBG 타입의 광섬유 센서를 내장한 텐던은 실내 UTM 장비에서 스트레인게이지 및 로드 셀과 비교할 때 매우 정확하게 일치하는 결과를 주어 센서로서 적용이 가능함을 확인하였다. 그러나 스마트 텐던을 기존 인장형 앵커의 일부 텐던에 교체 도입함으로써 외부에서 가한 긴장력을 측정할 결과, 실내와는 달리 로드셀과 광섬유 센서 관측결과에 약간의 차이가 발생함을 알 수 있었고 그 원인에 대한 분석을 수행하였다.
- (2) 암반과 화강풍화토 지반조건에 각각 정착된 실대형의 인장형 앵커의 자유장에 배치된 FBG센서에서 측정된 파장변화 데이터를 이용하여 온도변화(ΔT)에 의한 효과를 무시하고 산정된 변형률(ϵ_{FBG})로부터 그라운드 앵커의 긴장력(P_{FBG})을 간단히 산정하였다. 측정된 긴장력을 앵커 두부의 로드 셀에서 측정된 긴장력($P_{Loadcell}$)값과 비교한 결과, 강도가 큰 암반에 정착된 인장형 앵커의 긴장력 측정결과는 토사지반에 정착된 앵커에 비해 전체 하중단계에서 그 변동성이 상대적으로 작으며 실용적으로는 두 정착장 조건 모두 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.
- (3) 본 연구에서 제안한 FBG센서를 내장한 스마트 텐던을 이용하면 기존 인장형 그라운드 앵커의 장력 측정을 위한 유일한 계측 방법이었던 로드 셀에 의한 측정방법과 함께 매우 경제적이고 효과적으로 긴장력 모니터링이 가능할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 자연재해저감 기술개발 사업 연

구과제(NEMA-자연-2010-37) 및 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2010-0024625)을 받아 수행되었으며, 현장실험에 도움을 주신 (주)삼우기초기술 김정렬 사장 및 직원께 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김낙경 (2001), 인장형 앵커와 압축형 앵커의 하중전이에 관한 연구, *한국지반공학회 논문집*, 제 17권 3호, pp.59-68.
2. 김래현, 이기환, 이우진, 김대규, 김낙경 (2002), 현장시험에 의한 그라운드 앵커 시스템의 크리프 및 단기거동 특성 연구, *대한토목학회 논문집*, 제 22권 6-C호, pp.585-594.
3. 김영만, 조규완, 김응규, 김현모 (2004), 압축형 앵커의 하중분산 및 인발특성에 관한 연구, *대한토목학회 정기학술대회 논문집*.
4. 김영상, 서동남, 김재민 (2008), FBG 센서를 내장한 스마트 앵커의 개발과 적용, *한국지반공학회 봄학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, pp.393-398.
5. 김영상, 서동남, 김재민, 성현종 (2009), FBG 센서가 내장된 스마트 텐던을 이용한 7연 강연선의 인발 하중전이 특성, *한국방재학회 논문집*, 제 9권 5호, pp.79-86.
6. 김재민, 김영상, 김현우, 서동남, 윤정방 (2007), FBG 센서를 내장한 스마트 강연선 개발, *전산구조공학회 논문집*, 제 20권 2호, pp.121.
7. 김재민, 김영상, 윤정방 (2007), *광섬유 복합 강연선 그 광섬유 복합 강연선의 제조방법 및 변형률 측정방법*, 특허 등록 제 10-0756056호.
8. 임성순, 이재수 (1999), 지하굴착시 암반지반속에 정착된 어스앵커의 초기인장력 결정, *대한토목학회 논문집*, 제 19권 III-1호, pp. 177-187.
9. 전상수, 김두섭, 장양원 (2008), 다철근 네일의 현장인발시험 및 수치해석, *한국지반공학회논문집*, 제 24권 8호, pp.43-52.
10. 허병주, 김찬기, 정용진, 천병식 (2010), 부력저항 영구앵커의 장기거동 특성에 관한 연구, *한국지반환경공학회 논문집*, 제 11권 제12호, pp.27-35.
11. 홍석우 (2002), 현장실험에 의한 압축형 앵커의 인발거동특성 연구, *한국해양공학회지*, 제 16권 제2호, pp.44-52.
12. 홍원표, 윤증만, 송영석 (2004), 절개사면에 설치된 앵커지지 흙막이벽에 작용하는 측방토압 산정, *한국지반환경공학회 논문집*, 제 24권 제2호, pp.125-133.
13. FHWA-IF-99-015 (1999), "Ground Anchors and Anchored Systems".
14. 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.
15. Kim, J-M, Kim, H-W and Kim, Y-S (2010), "Tension Monitoring of a prestressing strand for concrete bridge using intendon FBG sensors", *IABMAS 2010*, Philadelphia, Pennsylvania, USA, pp. 205-210.
16. Liew, S.S., Tan, Y.C., Ng, H.B., and Lee, P.T. (2003), "New Approach of Using Jacked Anchors as Reinforcements in Soil Stabilisation Works for a Cut-And-Cover Tunnel with 17m Deep Excavation", *ICOF 2003*, Dundee, Scotland, pp.1-15.
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-Chi Hsu and Chin-Ming Chang (2007), "Pullout Performance of Vertical anchors in gravel formation", *Engineering Geology* 90, pp.17-29.

(접수일자 2011. 2. 18, 심사완료일 2011. 6. 15)