

# 광섬유센서 내장 스마트 텐던을 이용한 지반보강재 장력 및 하중전이 모니터링 적용 사례



김 영 상  
전남대학교 공학대학  
건설·환경공학부 부교수  
geoyeskim@chonnam.ac.kr



김 재 민  
전남대학교 공학대학  
건설·환경공학부 교수

성 현 중  
전남대학교 공학대학  
건설·환경공학부 박사과정

윤 종 구  
한국유지관리(주)  
전략기획실장·공학박사

## 1. 서론

최근 들어 구조물이 대규모화되면서 지하구조물과 기초 설치를 위한 흠막이 굴착의 규모가 크게 증가하고 있으며 시공 중 및 유지 시 관리가 곤란하여 국내 대형공사들에서 흠막이 공법과 관련된 붕괴 사고가 빈번히 발생하고 있다. 뿐만 아니라 도시가 팽창하고 국토개발이 다양하게 진전됨에 따라 도로나 주택단지 건설 등에 의한 산지나 구

릉지를 절개하는 사례가 빈번해지면서 사면의 보강대책으로 영구앵커의 적용이 빈번해지고 있다. 그러나 흠막이 공법과 사면안정에 주로 사용되는 앵커에 도입된 긴장력을 측정하는 전기저항식 스트레인게이지나 바이브레이팅 와이어(vibrating wire) 타입의 기존 모니터링 방법은 앵커를 구성하고 있는 강연선의 변형률 및 장력 측정이 세밀하게 이루어질 수 없고 특히 센서의 수명이 수 년에 불과해 구조물의 수명과 같이 해야 하는 영구앵커의 장기적인

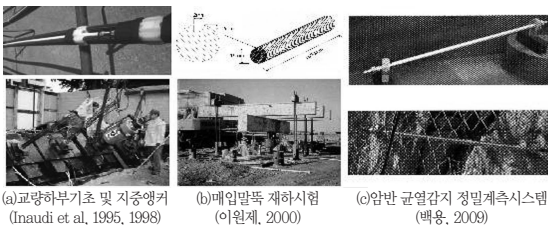
모니터링에는 한계를 가지고 있다.

본 기사에서는 앵커의 장력 모니터링을 개선할 수 있는 방안으로 광섬유 센서를 이용한 스마트 텐던의 적용에 대하여 기술하고자 한다. FBG 타입의 광섬유 센서를 이용하는 스마트 텐던은 7연 강연선의 변형을 및 장력변화를 효과적으로 모니터링 할 수 있도록 강연선 중앙 케이블 내부에 FBG센서를 삽입하여 개발하고 검증한 새로운 개념의 텐던이다. 스마트 텐던에 삽입된 FBG센서는 기존 스트레인지에이지 타입에 비해 크기가 작고 내구성이 우수하며 전자기파에 의한 노이즈 발생이 없고 하나의 리드선으로 다중점 측정(multiplexing)이 가능하여 보다 효과적으로 여러 지점을 관리할 수 있는 장점이 있다.

## 2. 광섬유 센서의 지반 구조물 적용사례

광섬유 센서 자체에 대한 이론적 연구와 결과 정립은 이미 상당한 수준에 이르러 있으며 광섬유 센서를 공학분야에 응용하는 기술에 대한 연구도 국내·외적으로 꾸준히 수행되어 오고 있다. 국내의 경우 광섬유센서 자체에 대한 연구는 전자·전파공학, 물리학 분야에서는 다양한 연구 성과가 있으나 토목구조물에 응용하여 적용한 사례나 연구는 아직 미흡한 상태이다. 그림 1에는 국내·외의 광섬유 센서를 이용한 대표적인 지반구조물의 적용사례를 보이고 있다.

그림 1(a)는 단일모드 광섬유에 광원을 입사시키면 광원은 연계를 통하여 50:50의 비율로 대상 구조물에 위치한 두 개의 단일모드 광섬유로 분할되는 특성을 이용하여 구축되는 SOFO 시스템의 예로 사면에 설치된 교량 하



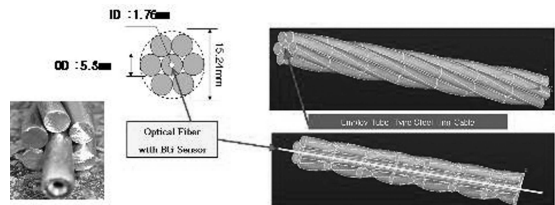
(a)교량하부기초 및 지중앵커 (Inaudi et al, 1995, 1998) (b)매입말뚝 재하시험 (이원제, 2000) (c)암반 균열감지 정밀계측시스템 (백용, 2009)

〈그림 1〉 광섬유 센서의 지반구조물 적용 사례

부기초 앵커에 설치된 SOFO 시스템 및 지중앵커에 설치된 SOFO 시스템이며, 그림 1(b)는 매입말뚝의 나선철근에 홈을 파서 FBG 센서를 접착제로 부착해서 매입말뚝의 하중전이 해석에 FBG센서를 적용한 사례이고 그림 1(c)는 암반의 균열 감지 및 미세길이 변화 측정을 위해 FBG 센서 패키지가 암반 절토사면에 적용된 사례이다.

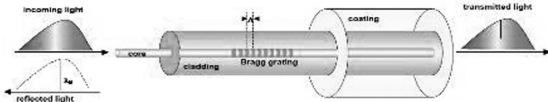
## 3. 스마트 텐던의 개념

본 기사에서 기술하는 스마트 텐던은 김재민 등(2007), 김영상 등(2009)이 7연 강연선의 변형을 및 장력변화를 효과적으로 모니터링 할 수 있도록 강연선 중앙 케이블 내부에 FBG센서를 삽입하여 개발하고 검증한 새로운 개념의 텐던이다. 스마트 텐던은 그림 2와 같이 강연선의 중앙 케이블을 중공 강재 튜브(φ1.0~2.0mm)로 교체한 후, 튜브 내부에 광섬유 센서를 삽입하고 접착제(폴리에스터 레진+경화제)를 주입하여 케이블과 일체가 되도록 한 7연 강연선이다(김재민 등, 2007).



〈그림 2〉 스마트 텐던의 개념도

그림 3은 FBG 센서의 구조를 나타내며 광대역(Broadband)의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, 브래그 조건식에 해당하는 파장 성분만이 광섬유 격자에 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다. 그러므로 FBG에 온도나 압력 등의 외부 물리량을 인가할 경우 브래그 파장이 달라지며 브래그 파장의 변화를 측정한다면 FBG에 가해진 물리량을 구할 수 있는 원리를 이용한다. 온도와 변형을 변화에 대한 브래그 반사파장의 변화량( $\Delta\lambda_B$ )은 식 (1)과 같다(Hill and Meltz, 1997).



(그림 3) FBG 센서의 구조 및 측정원리

$$\Delta\lambda_b = \lambda_b [1 - P_p] \Delta\varepsilon + (\alpha + \zeta) \Delta T \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$ : 광섬유의 온도에 따른 팽창계수로 실리카의 경우  $0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

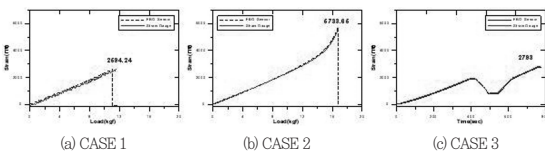
$\zeta$ : 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열 광학계수로서 약  $8.30 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

$P_p$ : 광탄성 상수로 게르마늄 실리카 유리의 경우 대략 0.22

$\Delta\varepsilon$ : 광섬유 격자에 가해진 변형률 변화량

$\Delta T$ : 광섬유 격자에 가해진 온도 변화량

김재민 등(2007)과 김영상 등(2008)은 스마트 텐던의 성능 검증을 위한 다양한 재료 및 역학 실험을 수행하였다. 그림 4는 중앙 케이블과 교체된 중공 튜브와 삽입된 FBG 센서의 일체화 실험 결과로 인장실험을 통하여 스마트 킹케이블에 내장된 FBG 센서의 변형률과 외부에 부착된 스트레인게이지로부터 측정된 변형률을 비교한 결과 FBG 센서와 전기저항식 스트레인게이지의 변형률 측정 결과가 매우 일치하였으며, FBG 센서가 전기저항식 스트레인게이지에 비해 잡음(noise)이 적게 발생함을 알 수 있어 센서로서의 기능이 우수함을 검증하였다.

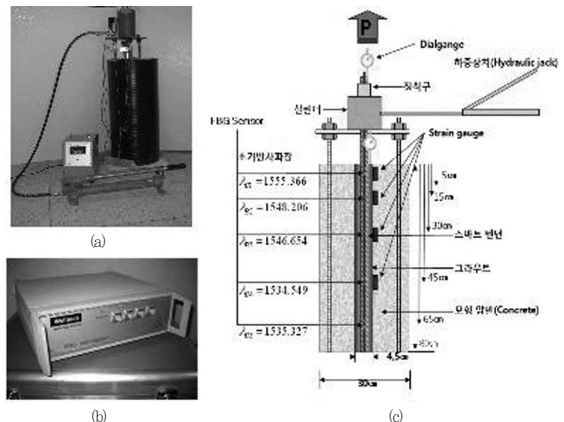


(그림 4) 중공 킹케이블 성능실험 결과(김재민 등, 2007)

#### 4. 스마트 텐던의 모형앵커 적용사례(서동남, 2008)

이 사례는 스마트 텐던을 이용하여 단선 강연선의 내부 변형과 텐던-그라우트 접촉면에서의 하중전달 메커니즘을 측정하기 위한 일련의 모형 앵커 실내실험이다. 지반 구조물의 보강재로서 빈번히 사용되는 앵커는 정착부 깊이에 따른 하중전이 현상에 대한 많은 연구가 수행되었음에도 불구하고 대부분 강연선이 아닌 강봉을 대상으로 한 연구들로 아직 강연선에 발생하는 실제 측정 사례는 없는 것으로 조사되었다.

강연선의 정착부에서의 하중전이 현상의 측정을 위하여 먼저 길이 방향으로 5개의 FBG 센서가 새겨진 0.8m 길이의 스마트 텐던이 준비되었다. 이를 콘크리트로 만들어진 모형압반에 삽입하고 그라우트를 타설하여 실험체를 제작하였으며 상부에는 인발실험을 위해 하중장치를 설치하였다(그림 5(a) 및 (c)). 텐던의 길이방향 변형률은 그림 5(c)에 나타난 바와 같이 스마트 텐던에 내장된 서로 다른 반사파장을 갖는 5개의 브래그 격자에서 측정되며 FBG 센서로부터 반사된 파장은 Welltech사의 FBG 인터로게이터(그림 5(b))를 이용하여 측정하였다.



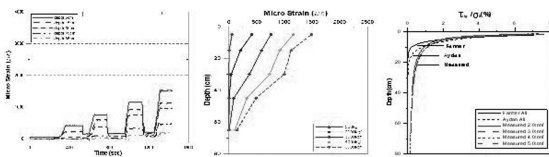
(그림 5) 인발실험 setup, 측정장치(인터로게이터)와 초기 반사파장(서동남, 2008)

FBG 센서에서 측정된 반사파장의 변화  $\Delta\lambda_B$ 는 식 (2)로부터 변형률의 변화량  $\Delta\varepsilon$ 으로 변환될 수 있으며 이때 지층의 온도변화가 미미하다는 가정하에 식이 유도되었다. 한편 매우 짧은 깊이증가에 대하여 식 (3)을 이용하여 강연선-그라우트 접촉면에서의 전단응력이 산정될 수 있다.

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

$$T_{tg} = \frac{E_s \cdot r_c}{2d} \cdot d\varepsilon \quad (3)$$

이와 같이 측정된 변형율의 시간, 깊이에 따른 그래프가 그림 6에 나타나 있으며 그림에 나타난 바와 같이 깊이 별 변형률 분포는 낮은 하중 단계에서는 강연선의 하부까지 작용하중이 전달되지 못하지만 하중이 증가함에 따라 작용하중이 하부로 전달되어 변형이 발생되며 같은 하중 단계에서는 깊이가 증가함에 따라 변형률이 급격히 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 기존에 강봉을 재료로 하는 하중전이 연구들의 연구결과가 강연선의 하중전이 현상에서도 동일함을 의미하며 모든 깊이에 일정한 전단응력과 부착응력이 유발된다는 가정 하에 수행되는 현재 설계가 실제 현상과 매우 상이함으로 알 수 있다. 또한 기존 이론식인 Farmer와 Aydan의 이론식에 의한 전단응력 분포와 비교한 결과, 제안된 이론식들이 전단응력 분포형태에 있어서는 유사한 형태를 제시하지만 기존의 이론식으로는 실제 전단응력의 크기와 응력 전달깊이를 제대로 표현하지 못하는 것으로 나타났다.

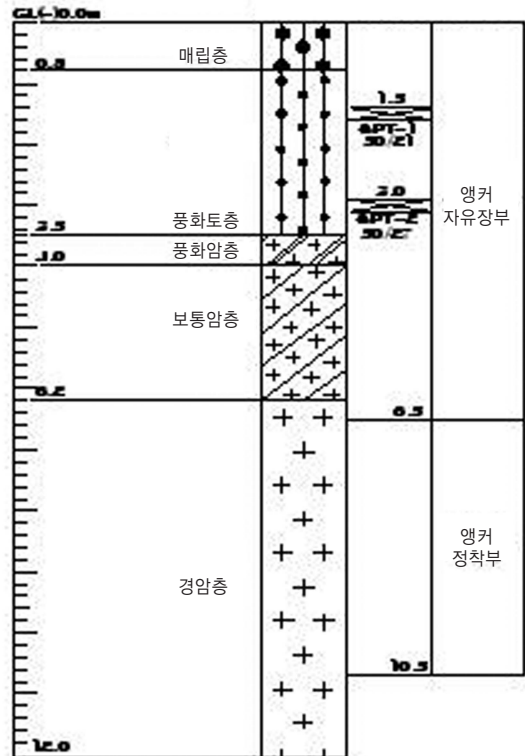


(a) 재하하중에 따른 위치별 변형률 측정결과 (b) 작용하중에 따른 깊이별 변형률 분포 (c) 강연선-그라우트 접촉면의 정규화된 전단응력 분포

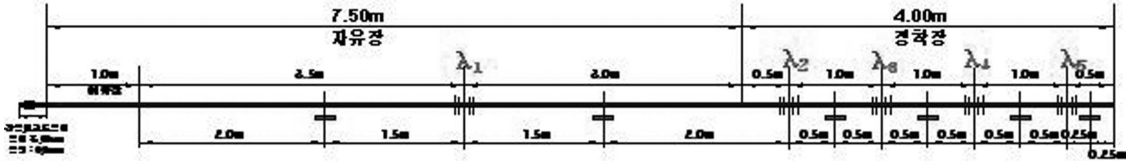
<그림 6> FBG 센서로부터 측정된 강연선의 변형률 및 전단응력 분포

## 5. 스마트 텐던의 실대형 앵커 적용사례

이 절에서는 실내 모형앵커에서 강연선의 하중전이를 효과적으로 측정할 수 있었던 스마트 텐던을 실대형 앵커의 장력모니터링에 적용한 사례로, 현장 인발실험은 전남대학교 해양환경 시뮬레이션 실험시설 건설공사 현장 원지반에서 수행되었다. 지반조사 결과를 바탕으로 볼 때 실험이 수행된 지반의 지층 구성은 그림 7과 같으며 상부로부터 매립층, 풍화토층, 풍화암층, 보통암층, 경암층 순으로 구성되었으며, GL(-)6.2m 이하는 경암층이 위치하고 있다. 현장 인발실험이 수행된 앵커의 정착장 구간은 GL(-)6.5~10.5m에 위치하므로 정착장 위치의 지반은 경암층 이상으로 확고한 정착이 이루어져 있을 것으로 판단된다.



<그림 7> 지층단면 및 정착장 위치

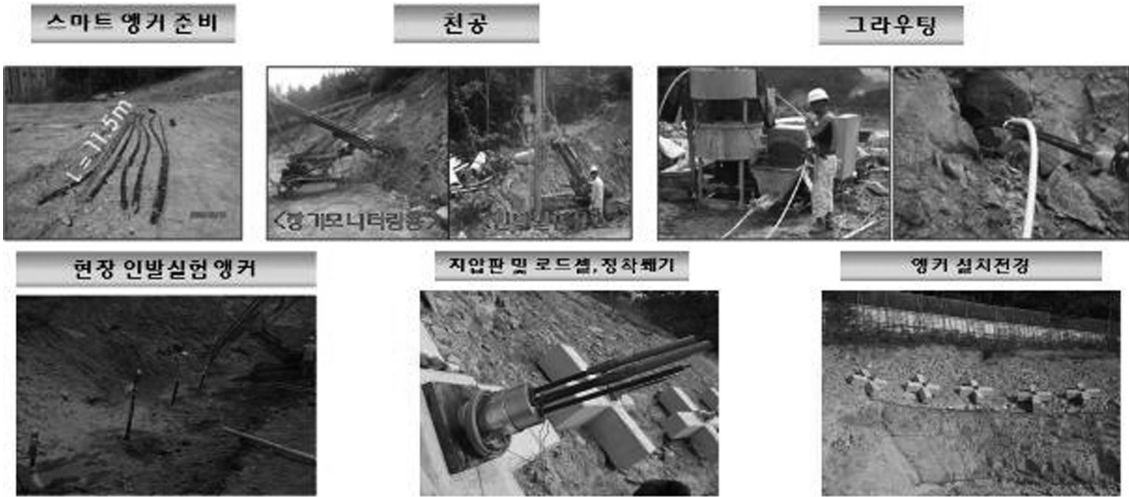


〈그림 8〉 스마트 텐던에 삽입된 FBG 센서 배치도

실대형 앵커의 현장 인발실험을 수행하기 위해 연장 11.5m의 스마트 텐던을 제작하였으며 스마트 텐던에 삽입된 FBG 센서의 배치도는 그림 8과 같다.

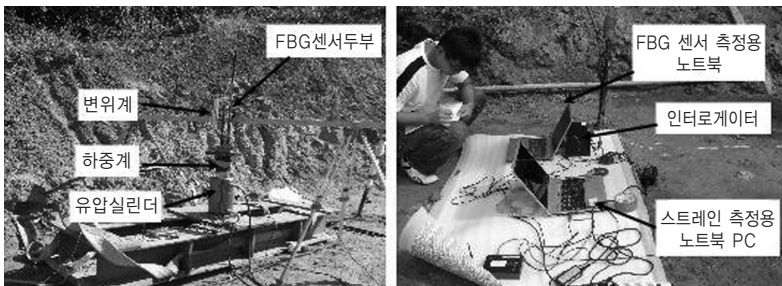
현장 인발실험에 사용된 앵커는 (주)삼우기초기술에서 판매되고 있는 상용 제품에 스마트 텐던을 일부 텐던과 교

체하여 실대형의 스마트 앵커(L=11.5m)로 제작하였으며, 스마트 앵커는 장력 모니터링 및 하중전이 계측 성능을 검증하기 위해 그림 9와 같이 현장의 원지반 및 절취사면에 각각 설치하였다.



〈그림 9〉 실대형 스마트 앵커 현장설치

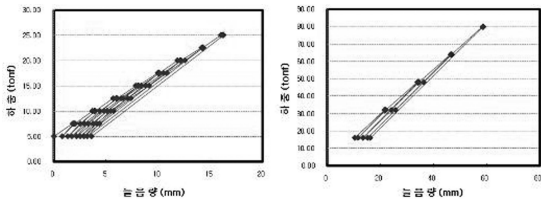
본 현장에서 사용된 인발실험 장비 및 계측장비는 그림 10과 같다.



〈그림 10〉 현장 인발실험 장비

항 목	규 격
유압펌프	700kgf/cm <sup>2</sup>
하중계(Load Cell)	100tonf
변위계(LVDT)	200mm
인터로게이터	MICRON OPTICS SM130 (측정범위 : 1510~1590nm)
압축형 물드 게이지	Tokyo Sokki PMFL-60-10LT (저항치 : 120Ω)

앵커는 로타리 타입의 드릴오거로 설치되었고 무가압으로 그라우트 되었다. 그라우트의 물-시멘트 비는 45%이고 28일 압축강도는 210kgf/cm<sup>2</sup>이다. 앵커에 적용된 스마트 텐던의 직경은 15.2mm이고 탄성계수는 200GPa이며 단면적은 1.39991cm<sup>2</sup>이다. 현장 인발실험은 앵커의 설계 하중(25tonf)까지의 하중단계와 극한강도 확인을 위한 하중단계로 나누어 수행하였다. 앵커의 설계하중까지의 하중단계는 5tonf의 초기하중에서부터 설계하중 25tonf까지 9단계이며, 극한강도 확인을 위한 하중단계는 16tonf의 초기하중에서부터 80tonf까지 5단계이다.



(a) 앵커 설계하중까지의 인발실험 하중단계 (b) 극한강도 확인을 위한 인발실험 하중단계

(그림 11) 현장 인발실험 하중재하 단계

현장 인발실험 결과 앵커의 설계 하중(25tonf)까지의 하중단계와 극한강도 확인을 위한 하중단계에서 자유장에 설치된 FBG센서에서 측정된 변형률( $\epsilon_{FBG1}$ )로부터 식 (4)를 이용하여 앵커에 작용하는 긴장력을 간단히 추정하였다. 그림 12에 나타난 바와 같이 스마트 텐던의 자유장에서 측정된 변형률로부터 환산된 긴장력 추정값 ( $P_{estimated}$ )은 앵커 두부의 로드셀에 의해 측정된 강연선의 긴장력( $P_{measured}$ )과 비교한 결과 일반적으로 인장형 앵커의 텐던에 작용하는 하중레벨까지는 거의 일치하는 값을 나타내어 개발된 스마트 텐던을 이용한 장력측정 가능성 및 현재 로드셀 형식으로 사용되고 있는 시험 앵커의 장력 측정 방법의 대체 가능성을 확인하였다.

$$P_{estimated} = A_t \times E_t \times \epsilon_{FBG1} \quad (4)$$

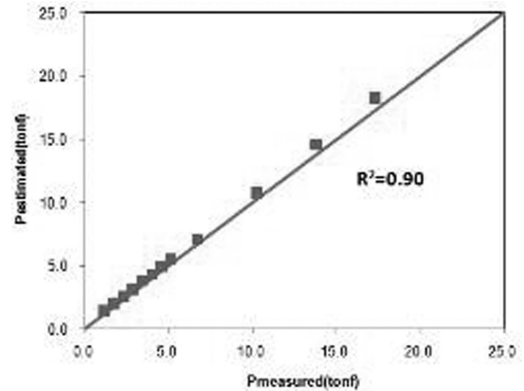
여기서,  $P_{estimated}$  : 스마트 텐던에 작용하는 긴장력 예측값

$E_t$  : 텐던의 탄성계수

(= 200GPa=2039431.53kg/cm<sup>2</sup>)

$A_t$  : 텐던의 단면적(= 1.39991cm<sup>2</sup>)

$\epsilon_{FBG1}$  : FBG 센서로 측정된 변형률



(그림 12) FBG 센서를 이용한 스마트 텐던의 긴장력 추정결과 비교(설계하중)

## 마치는 글

본 기사에서는 앵커나 교량 등 다양한 토목 분야에서 활용되고 있는 7연 강연선에 광섬유 브래그 격자 센서를 내장하여 개발된 스마트 텐던을 적용하여 7연 강연선의 장력측정 및 하중전이 계측 성능에 대하여 그동안 저자들에 의해 수행된 연구 결과들을 정리한 것이다.

- 1) 광섬유센서를 내장한 스마트 텐던을 실내 모형 앵커 인발실험에 적용한 결과, 5개의 FBG 센서들이 각 하중단계에서 효과적으로 변형률을 측정하며, 측정된 변형률을 이용하면 강연선-그라우트 접촉면에서의 전단응력 크기와 하중전이 깊이를 매우 실제적으로 표현할 수 있다. 따라서 제안된 스마트 텐던을 이용하면 앵커 주변에 실제 하중전이를 측정하고 추후 이를 이용한 경제적인 앵커 정착장 설계에 대한 연구수행이 가능할 것으로 판단된다.
- 2) 스마트 텐던을 11.5m의 실대형 인장형 앵커에 적용한 결과, 자유장 FBG센서에서 측정된 변형률( $\epsilon_{FBG1}$ )을 이용하여 스마트 텐던에 작용하는 긴장력을 간단히 추정할 수 있으며, 앵커

두부의 로드셀에 의해 측정된 강연선의 긴장력( $P_{measured}$ )과 비교한 결과 일반적인 앵커 설계하중 레벨까지 일치하는 값을 나타내어 개발된 스마트 텐던의 장력측정 능력을 검증하였으며 현재 로드셀 형식으로 사용되고 있는 시험 앵커의 장력 측정 방법의 대체 가능성을 확인하였다.

- 3) 현재 현장 절취사면에 인장형 및 압축형 앵커가 시공되어 장기 모니터링을 수행하고 있으며, 제안된 광섬유 센서를 이용한 스마트 텐던을 앵커에 적용하여 도심 굴착 및 영구 보강 사면의 장력 모니터링에 활용할 경우 흙막이 토류벽 및 영구 보강사면의 안전관리 및 장기 모니터링에 매우 효과적이며, 자동화 유지관리 시스템 구축도 용이할 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 2009년도 건설교통기술평가원 스마트 텐던 기술이전 및 상용화를 위한 추가기술 개발 연구과제(08TRPI-C051-831-01) 및 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2009-0062926)을 받아 수행되었으며, 현장 인발실험을 위해 헌신적인 노력을 아끼지 않은 (주)삼우기초기술의 김정렬 사장님, 정종기 과장, 박대웅 대리에게 깊은 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 김영상, 김재민, 성현종, 김현우 (2009) 스마트 텐던 기술 이전 및 상용화를 위한 추가 기술 개발, 건설교통 R&D 정책·인프라 연구개발계획서, 전남대학교.
2. 김영상, 서동남, 김재민 (2008) FBG 센서를 내장한 스마트 앵커의 개발과 적용. 한국지반공학회 봄학술발표회논문집, 한국지반공학회, pp. 393~398.

3. 김영상, 서동남, 김재민, 성현종 (2009) FBG센서가 내장된 스마트 텐던을 이용한 7연 강연선의 인발 하중전이 특성. 한국방재학회논문집, 한국방재학회, 제9권, 제5호, pp. 79~86.
4. 김재민, 김영상, 김현우, 서동남, 윤정방 (2007) FBG 센서를 내장한 스마트 강연선 개발. 전산구조공학회논문집, 전산구조공학회, 제20권, 제2호, pp. 121.
5. 백 용(2009) 광섬유 센서를 이용한 암반사면 계측시스템 구축 기술. 한국방재학회지, 한국방재학회, 제9권, 제2호, pp. 34~37.
6. 서동남 (2008) FBG 센서를 내장한 스마트 앵커의 개발과 하중전이 해석, 석사학위논문, 전남대학교.
7. 이원제 (2000) 매입말뚝의 하중전이 해석 및 지지력 특성 평가, 박사학위논문, 고려대학교.
8. Hill, K. O. and Meltz, G., 1997. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview, IEEE J. Lightwave Technol. 15 (8), pp. 1263~1276.
9. Inaudi, D., 1995. Coherence multiplexing of in-line displacement and temperature sensors, Optical Engineering, Vol. 34, No. 7.
10. Inaudi, D., Casanova, N., Martinola, G., Vurpillot, S. and Kronenberg, P., 1998. SOFO: Monitoring of Concrete Structures with Fiber Optic Sensors, 5th International Workshop on Material Properties and Design, Weimar, October, Aedificatio Publishers, pp. 495~514.