

## FBG 센서를 내장한 스마트 앵커의 개발과 적용 Development and Application of A Smart Anchor with Optical FBG Sensors

김영상<sup>1)</sup>, Young-Sang Kim, 서동남<sup>2)</sup>, Dong-Nam Suh, 김재민<sup>3)</sup>, Jae-Min Kim, 이승래<sup>4)</sup>, Seung-Rae Lee

- 1) 전남대학교 건설·환경공학부 조교수, Assistant Prof., Division of Civil & Environmental Eng., Chonnam National Univ.
- 2) 전남대학교 해양공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Ocean Eng., Chonnam National Univ.
- 3) 전남대학교 건설·환경공학부 부교수, Associate Prof., Division of Civil & Environmental Eng., Chonnam National Univ.
- 4) 한국과학기술원, 건설 및 환경공학과 교수, Prof. Dept. of Civil & Environmental Eng., KAIST

**SYNOPSIS** : With the substantial increase of the size of structure, management and monitoring of excavation for the foundation construction 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 type monitoring system.

FBG Sensor, which is smaller than strain gauge and has better durability and does not have a noise from electromagnetic waves, was adapted to develop a smart anchor. A series of pullout tests were performed to verify the feasibility of smart anchor and find out the load transfer mechanism around the steel wire fixed to rock with grout.

**Key words** : FBG Sensor, Smart anchor, load transfer, long term maintenance

### 1. 서론

최근 들어 구조물이 대규모화되면서 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. 그러나 오래전에 국외에서 제안된 방법에 의존하여 앵커설계가 진행되고 있으며 국내에서 이와 관련된 연구성과가 많지 않아 보다 효율적인 앵커설계와 시공 및 장기간의 유지관리를 위한 많은 연구가 필요한 상태이다.

이에 본 연구에서는 기존 스트레인게이지 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)센서를 이용하여 강연선의 변형률과 장력을 안전하고 장기적으로 계측할 수 있는 스마트 강연선을 개발하였다. 또한 스마트 강연선을 이용하여 제작된 앵커의 하중전달 과정을 측정하고 그 결과는 토론하였다.

### 2. 광섬유 센서

광섬유를 이용한 변형률 센서는 측정방식에 따라 브래그격자 광섬유센서(Fiber Bragg Grating

sensor, 이하 FBG 센서), 광강도센서(intensity sensor) 그리고 간섭형 센서(interferometric sensor)로 구분할 수 있다. 다음 2.1절에서는 여러 종류의 광섬유센서 중에서 연구가 활발히 진행되고 있고 대형 토목구조물에 광범위하게 적용되어진 FBG 센서의 원리에 대한 기술과 2.2절에서는 국내·외의 광섬유 센서를 이용한 대표적인 지반구조물 적용사례를 기술하였다.

## 2.1 FBG 센서의 원리

FBG센서는 한 가닥의 광섬유에 여러 개의 브래그 격자를 일정한 간격으로 새긴 후, 온도나 강도 등 외부의 조건변화에 따라 각 격자에서 반사되는 빛의 파장이 달라지는 특성을 이용한 센서이다. 그림 1은 FBG 센서의 구조를 나타내며 광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, 아래에 주어진 식 (1)과 같은 브래그 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유 격자에 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다(김기수 등, 2005).

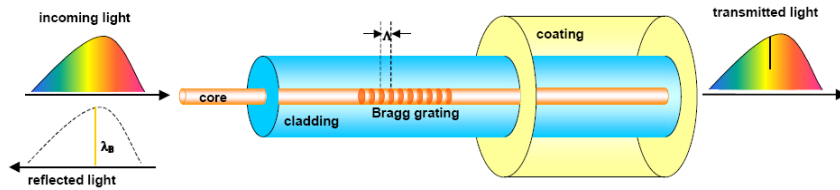


그림 1. FBG 센서의 구조 및 측정원리

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

여기서,  $\lambda_B$ : 반사 측정되는 Bragg 파장,  $n$ : 광섬유의 굴절률,  $\Lambda$ : 제작된 격자 간격

광섬유 격자에서 반사되는 브래그 파장은 식 (1)과 같이 굴절률과 격자 간격의 함수이며, FBG에 온도나 압력 등의 외부 물리량을 인가할 경우 브래그 파장이 달라진다. 그러므로 브래그 파장의 변화를 측정한다면 FBG에 가해진 물리량을 구할 수 있다. 온도와 변형률 변화에 대한 브래그 반사파장의 변화량( $\Delta\lambda_B$ )은 식 (2)와 같다(Hill and Meltz, 1997).

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(1 - P_e)\Delta\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T] \quad (2)$$

여기서,  $\alpha$ : 광섬유의 온도에 따른 팽창계수로 실리카의 경우  $0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,  $\xi$ : 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열 광학계수로서 약  $8.30 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,  $P_e$ : 광탄성 상수로 게르마늄 실리카 유리의 경우 대략 0.22,  $\Delta\epsilon$ : 광섬유 격자에 가해진 변형률 변화량,  $\Delta T$ : 광섬유 격자에 가해진 온도 변화량

이때 본 연구에서 개발하는 스마트 앵커의 경우, 지중에 삽입되므로 온도 변화가 크지 않을 것으로 예상되므로 온도 변화에 대한 브래그 반사파장의 변화량을 무시하면( $\Delta T = 0$ ), 다음 식(3)과 같이 반사 파장의 변화량( $\Delta\lambda_B$ )으로부터 변형률의 변화량( $\Delta\epsilon$ )을 알 수 있다.

$$\Delta\epsilon = \frac{1}{(1 - P_e)} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (3)$$

## 2.2 지반구조물에서의 광섬유센서 적용 사례

광섬유센서 자체에 대한 이론적 연구와 결과정립은 이미 상당한 수준에 이르러 있다. 또한 광섬유센서를 공학분야에 응용하는 기술에 대한 연구도 국내·외적으로 많은 연구진들이 수행해 오고 있다. 국내의 경우 광섬유센서 자체에 대한 고유 분야인 전자·전파공학, 물리학 분야에서는 다양한 연구 성과가 있으나 토목구조물에 응용하여 적용한 사례나 연구는 아직 미흡한 상태이다. 그림 2는 국내·외에서 광섬유센서를 이용한 대표적인 지반구조물에서의 적용사례들이다.

- 그림 2(a) 지중앵커에 설치된 SOFO 시스템 : 앵커체 정착부 토질 특성에 따른 인발지지력 평가
- 그림 2(b) 매입말뚝 하중전이 해석에 FBG 센서 적용 : 매입말뚝의 나선철근에 홈을 파서 FBG 센서를 접착제로 부착
- 그림 2(c) FBG 센서를 이용한 FRP Nail 인발시험 : 광섬유센서를 삽입한 FRP Nail을 이용한 인발시험과 지중온도 및 변형률 측정

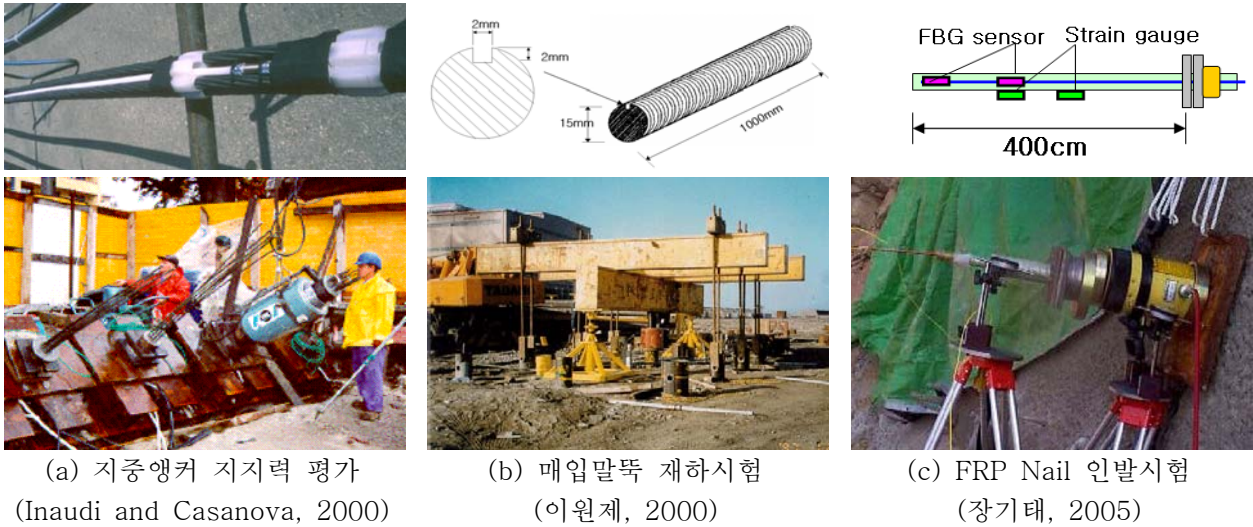


그림 2. 광섬유 센서의 지반구조물 적용사례

## 3. 스마트 앵커의 개발

본 연구에서는 그림 3과 같은 스마트 강연선을 제작하고 지반공학 분야에 활용한 스마트 앵커를 제안하였다. 스마트 강연선은 강연선의 킹케이블을 중공 강제 튜브로 치환한 후, 튜브 안에 광섬유센서를 삽입하고 접착제를 주입하여 케이블과 일체가 되도록 함으로써 강연선의 변형률을 직접 측정하여 장력을 알 수 있도록 제안된 강연선이다(김재민 등, 2007).

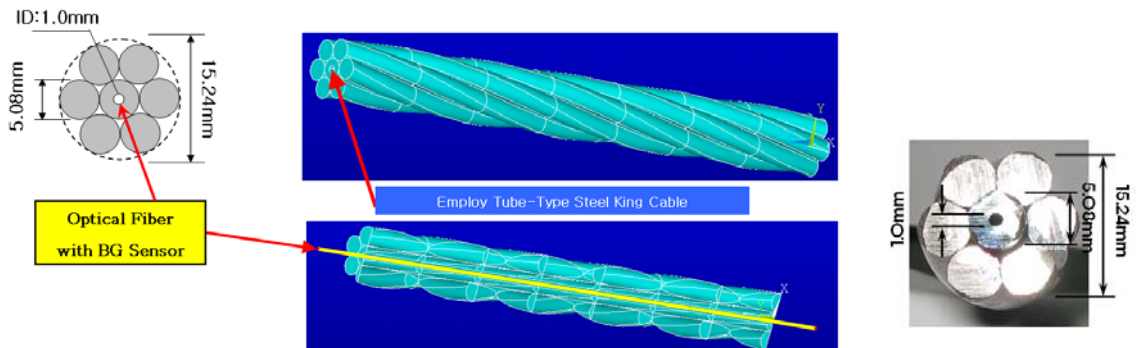


그림 3 개발된 스마트 강연선 개념도 및 실물단면

### 3.1 킹케이블과 강연선의 역학시험 비교결과

길이 50cm인 스마트 킹케이블 시편 3개를 제작하여 그림 4a와 같이 인장시험을 수행하였다. 인장시험 시 거동비교를 위하여 광섬유 브래그 격자 센서가 새겨진 위치의 시료외부에 전기저항식 스트레인게이지를 부착하였으며, 3개 시편 중 재하(loading) 및 제하(unloading) 시험을 실시한 시편에 대한 실험 결과가 그림 4b에 나타나 있다. 그림에 나타난 바와 같이 FBG 센서와 전기저항식 스트레인게이지의 변형률 측정 결과가 매우 일치하는 것을 알 수 있어 FBG 센서가 변형률을 측정하는 센서로서의 성능이 기존의 스트레인게이지와 비교할 때 떨어지지 않고 오히려 전기저항식 스트레인게이지에 비해 잡음(noise)도 적게 발생하여 센서로서의 기능이 매우 우수한 것으로 생각된다.

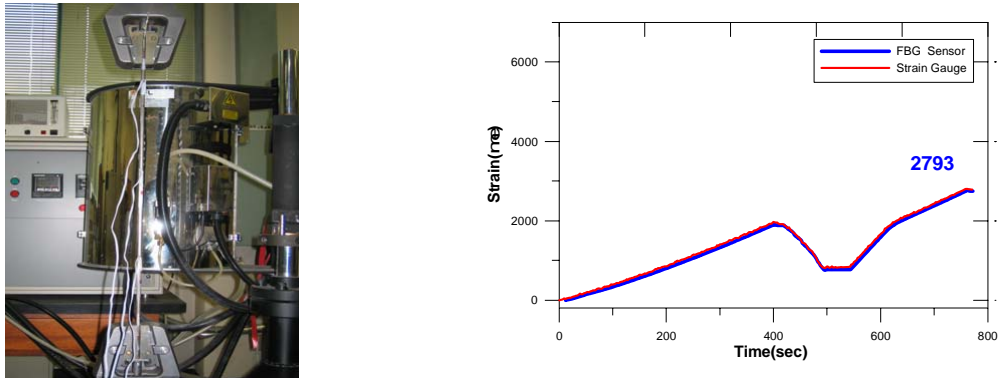
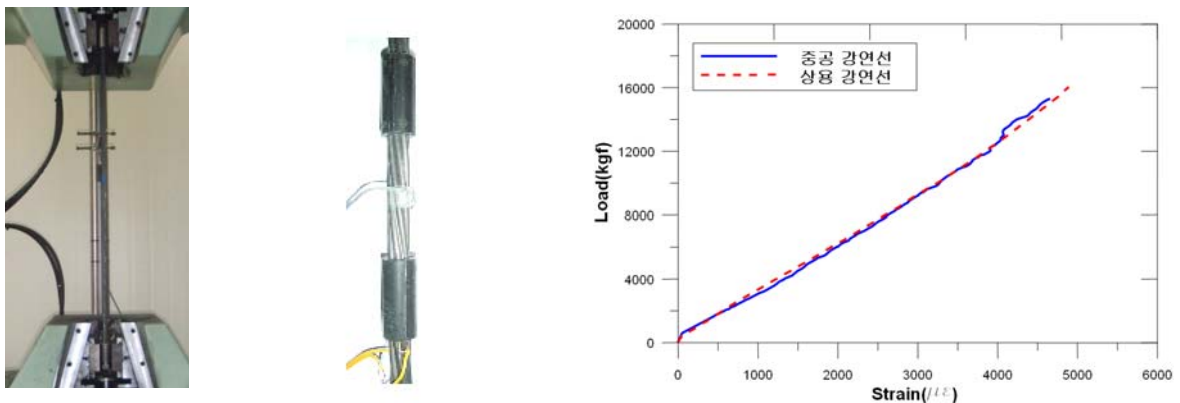


그림 4 스마트 킹케이블의 성능실험

다음은 강연선 전체의 역학적인 거동 변화를 확인하기 위하여 중공 킹 케이블을 포함하는 강연선과 상용 강연선의 인장시험 결과를 비교하였다. 이때 강연선의 변형률은 Tensmeg(그림 5(b))을 강연선의 외부에 장착함으로써 강연선 중앙지점의 변형률을 측정하였고 항복하중과 극한하중은 인장시험기(U.T.M)에서 측정하였다.

실험 결과 그림 5(c)에서 보는 바와 같이 중공 강연선과 상용 강연선의 하중-변형 거동은 매우 일치하였다. 또한 항복하중과 극한하중 시험에 있어 중공된 강연선은 23ton, 26ton으로 상용 강연선과 거의 같은 강도를 발휘함을 확인하였다. 이는 강연선의 킹케이블 하나가 강연선 전체에 대하여 차지하는 역할이 단면적 비율로 계산할 때 약 1/7에 해당하기 때문에 큰 영향을 미치지 않으며, 강연선의 인장 거동시 나선형으로 배치된 6가닥의 소선에 의해 주로 저항하기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 강연선 인장실험 (b) Tensmeg의 설치 (c) 중공 강연선과 상용 강연선의 변형률 측정 비교  
그림 5 중공 강연선과 상용 강연선의 변형률 측정

#### 4. 스마트 앵커 모형실험

현재 앵커 설계 시에는 앵커 길이방향으로의 응력 분포를 무시하고 앵커에 작용하는 마찰저항이 길이 방향으로 동일하게 분포한다는 가정 하에 앵커의 정착길이를 결정하고 있다. 본 연구에서는 개발된 스마트 강연선을 이용하여 강연선-그라우트 접촉면에서의 하중전달 메카니즘의 파악을 위한 모형앵커 실험을 수행하였다.

먼저 그림 6(a)와 같이 스마트 강연선 주위에 그라우트와 콘크리트를 타설하여 모형 암반과 모형 앵커 실험체를 제작하였고 상부에는 인발시험을 위해 유압장치를 설치하였다. 강연선-그라우트 접촉면에서의 변형률 측정은 그림 6(b)에 나타난 바와 같이 스마트 강연선에 내장된 서로 다른 반사파장을 갖는 5개의 브래그 격자에서 이루어진다. 또한 FBG 센서로부터의 반사파장은 Welltech사의 FBG 인터로게이터를 사용하여 측정하였다. 정적인 반복재하에 의해 인장시험을 실시하며 초기하중은 0.5ton, 최대하중은 10.0ton으로 결정하여 총 7단계(2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 ton)로 나누어 재하하였다. 시험결과 작용하중 9.2ton에서 그라우트와 암반의 부착파괴가 발생하여 실험이 종료되었으며, 그림 7은 스마트앵커서 측정된 반사파장과 광탄성계수(0.22)를 적용하여 변형률로 산정하여 나타낸 결과이다. 그림 7(a)는 강연선의 시간에 따른 변형률 분포로 그림에서 보는 바와 같이 시험이 종료될 때까지 5개의 FBG 센서가 효과적으로 강연선의 변형을 측정하며 7단계의 단계하중 별로 재하(loading)와 제하(unloading)를 잘 표현함을 알 수 있다. 또한 그림 7(b)는 스마트 강연선에서 측정된 변형률을 적용하중에 따라 깊이별로 나타낸 것으로 낮은 하중단계에서는 강연선의 하부까지 작용하중이 전달되지 못하지만 하중이 증가함에 따라 작용하중이 하부로 전달되어 변형이 발생되고 또한 같은 하중단계에서 깊이가 증가함에 따라 변형률이 감소되는 것을 확인할 수 있다.

따라서 스마트 앵커에서 측정된 변형률 분포와 식 (4)를 이용하여 강연선-그라우트 접촉면에서의 전단응력을 산정하고 이를 바탕으로 정착장 설계가 이루어진다면 기존의 설계방법보다 현실적이고 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

$$\tau_{tg} = \frac{E_t \cdot \epsilon_t}{2d} \cdot \Delta \lambda \quad (4)$$

여기서,  $\tau_{tg}$ : 두 변형률계 사이의 평균 전단응력  
 $d$ : 두 변형률계 사이의 거리  
 $\Delta \lambda$ : 두 변형률계에서 측정된 변형률 차이

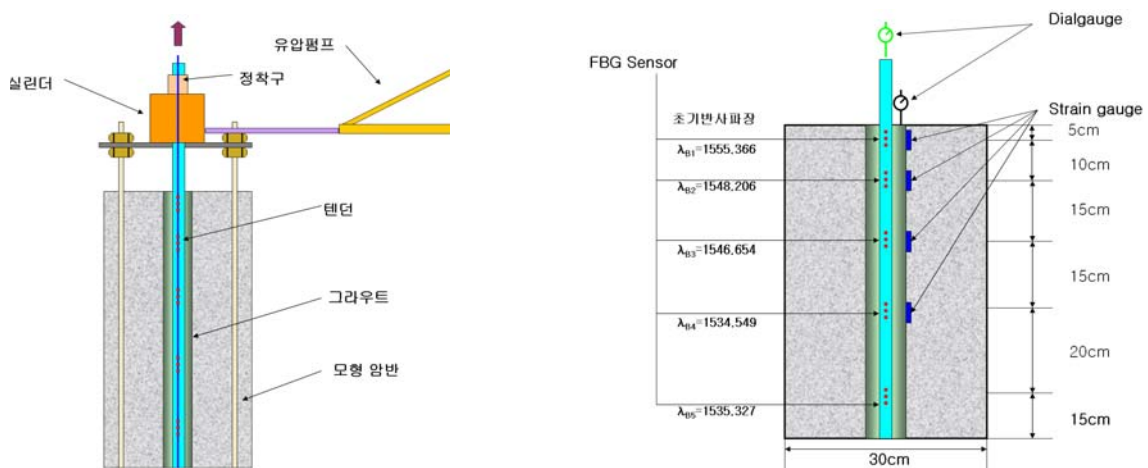
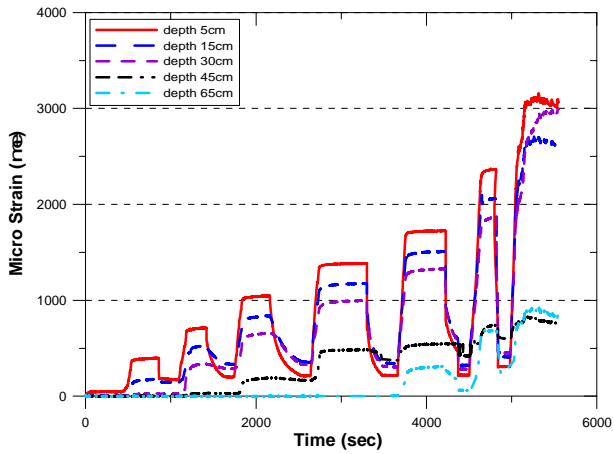
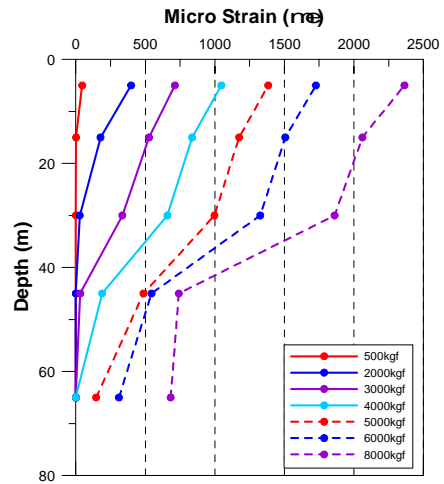


그림 6 모형 앵커실험의 셋업 및 FBG 센서의 변형률 측정 위치





(a) 시간에 따른 변형률 분포



(b) 작용하중에 따른 깊이별 변형률 분포

그림 7 FBG 센서로부터 측정된 강연선의 변형률 분포

## 5. 결론

1. 스마트 킹케이블 내부에 고정된 FBG 센서와 외부에 부착된 전기저항식 스트레인게이지의 변형률 계측 결과, 두 센서의 변형률 계측결과가 매우 일치하며 광섬유센서에서 측정된 값에 전기노이즈가 오히려 감소하였고 중공 킹케이블과 접착체에 의해 고정된 FBG 센서가 거의 일체 거동함을 확인하여 개발된 스마트강연선과 스마트앵커가 하중변화에 의한 앵커케이블의 변형과 장력변화를 잘 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 5개의 FBG 센서가 새겨진 1m 길이의 모형 스마트 앵커를 이용하여 모형앵커 인발시험을 수행한 결과, 5개의 FBG 센서들이 각 하중단계에서 길이방향 변형률 분포를 효과적으로 측정하였다. 따라서 스마트 앵커를 이용하여 강연선-그라우트 접촉면의 실제 전단응력을 측정하고 이를 이용한 하중전이 메커니즘을 연구한다면 보다 경제적인 설계와 추후 장기 모니터링에 대한 대책마련이 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2007년 스마트 사회기반시설 연구센터의 지원에 의해 이루어진 것이며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 김기수, 송영철, 방기성, 윤덕중(2005), "광섬유센서의 사회기반 구조물에의 활용", **한국복합재료학회지**, Vol 18, No 3, pp. 59~64.
- 김재민, 김영상, 김현우, 서동남, 윤정방(2007), "FBG 센서를 내장한 스마트 강연선 개발", **전산구조공학회 학술발표대회논문집**, 제 20권 제 2호. pp. 121.
- 이원제(2000), "매입말뚝의 하중전이 해석 및 지지력 특성 평가", **고려대학교 박사학위논문**, pp. 75~97.
- 장기태(2005), "지중온도와 변형률과의 상관관계를 통한 활동영역의 추정", **대한지구물리학회 지구물리**, Vol. 8, No. 3, pp. 123~130.
- 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.
- Inaudi, D. and Casanova, N.(2000), "Geo-structural monitoring with long-gage interferometric sensors", **SPIE Conference**, Newport Beach, USA, 5-9, pp. 1~10.