

FBG 센서가 내장된 스마트 앵커를 이용한 앵커와 그라우트의 하중전이 측정 **Measurement of Load Transfer between Anchor and Grout using Optical** **FBG Sensors embedded in Smart Anchor**

서동남¹⁾, Dong-Nam Suh, 김영상²⁾, Young-Sang Kim, 김재민³⁾, Jae-Min Kim

¹⁾ 전남대학교 해양공학과 석사과정, Graduate student, Division of Civil & Environmental Eng., Chonnam National Univ.

²⁾ 전남대학교 건설·환경공학부 조교수, Assistant Prof., Division of Civil & Environmental Eng., Chonnam National Univ.

³⁾ 전남대학교 건설·환경공학부 부교수, Associate Prof., Division of Civil & Environmental Eng., Chonnam National Univ.

SYNOPSIS : 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. Distribution of shear stresses at steel wire-grout interface is assessed from the measured strain distribution by the optical fiber sensors and compared with stress distributions predicted by Farmer's and Aydan's formulas. It was found that present theoretical formulas may underestimate the failure depth and magnitude of shear stresses when the pullout loads increase.

Key words : FBG Sensor, Smart anchor, load transfer, shear stress

1. 서론

앵커공법은 토목이나 건축의 구조물을 지반에 정착시키기 위하여 고강도 강재에 프리스트레스(pre-stress)력을 도입하여 주변지반의 변형을 최소화 할 수 있는 공법으로 토류벽의 지보공, 영구앵커 토류벽, 송전탑 기초, 댐의 보강, 지하구조물의 부력앵커, 사면 보강 등으로 널리 적용되고 있다.

이에 본 연구에서는 기존 스트레인게이지 타입에 비해 크기가 작고 내구성이 우수하며 전자기파에 의한 노이즈 발생이 없고 하나의 리드선으로 다중점 측정이 가능한 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating; FBG)센서를 이용하여 스마트 강연선을 개발하였다. 또한 스마트 강연선을 이용하여 모형 락앵커 실험체를 제작하였고 인발시험을 실시하여 강연선과 그라우트 접촉면, 그라우트와 모형암반의 접촉면에 작용하는 변형률을 측정하여 암반에 그라우트로 고정된 앵커의 하중전이특성에 대하여 연구하였다. FBG 센서에서 측정된 강연선과 그라우트 접촉면에서의 전단응력 분포를 Farmer(1975), Aydan(1993)이 제안한 기존 이론식과 비교·분석하고 강연선 형태의 앵커 하중전달 메커니즘의 예측을 위한 새로운 상관식을 도출하였다.

2. 앵커의 전단응력 분포에 대한 이론식들

락앵커의 응력분포에 대하여 Farmer와 Aydan 등이 연구한 바 있으며 Farmer와 Aydan에 의한 텐던-그라우트 접촉면에서의 전단응력 이론식은 다음과 같다(원상연, 2001).

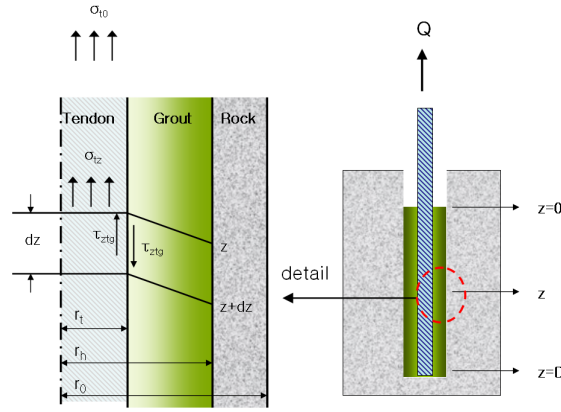


그림 1 텐던-그라우트 경계면에서의 전단응력

2.1 Farmer(1975)에 의한 텐던-그라우트 접촉면에서의 전단응력

텐던-그라우트 경계면의 하중전달기구(load transfer mechanism)는 그림 1과 같이 인장력이 텐던에 작용하면 텐던-그라우트 경계면을 따라 전단응력이 발생한다. Farmer(1975)는 그라우트-암반 접촉면에서 수직변위가 없다는 가정 하에서 텐던-그라우트에서의 전단응력에 대한 식 (1)을 유도하였다.

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

여기서, τ_{tg} : 임의 깊이 z 에서의 텐던-그라우트 경계면의 전단응력, r_t : 텐던의 반경, r_h : 천공의 반경, σ_0 : 텐던 상단의 인장응력, z : 앵커 상단에서 깊이방향으로의 거리

식 (1)에서 Ω 는 그라우트 직경에 따라 식 (2), 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\Omega = \left[\frac{R}{r_t(r_h - r_t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{그라우트 직경이 얇은 경우}(r_h - r_t < r_t) \quad (2)$$

$$\Omega = \left[\frac{R}{r_t^2 \cdot \ln\left(\frac{r_h}{r_t}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{그라우트 직경이 두꺼운 경우}(r_h - r_t > r_t) \quad (3)$$

여기서, R 은 텐던의 탄성계수(E_t)에 대한 그라우트의 탄성계수(E_g) 비(ratio)이다.

2.2 Aydan에 의한 텐던-그라우트 접촉면에서의 전단응력

한편 Aydan 등은 Farmer가 제안한 식을 확장하여 그라우트-암반 접촉면에서의 수직변위(w_h)를 고려하여 텐던-그라우트 접촉면에서의 전단응력(τ_{tg})에 관한 식을 다음과 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 : 텐던과 그라우트 접촉면에서의 z방향 변위, w_h : 그라우트와 암반 접촉면에서의 z방향 변위

3. 스마트 강연선과 앵커 모형실험

본 연구에서는 스마트 앵커를 개발하기 위하여 지반구조물이나 교량구조물 등 다양한 토목구조물에 사용되는 7연-강연선을 대상으로 광섬유센서를 내장한 스마트 강연선을 활용하였다. 스마트 강연선은 중앙 킹케이블에 광섬유센서를 내장하며 킹케이블의 주위를 6가닥의 소선이 둘러싸고 있어 광섬유를 잘 보호하면서도 강연선의 길이변형을 효과적으로 측정할 수 있도록 고안된 부재형 센서이다. 자세한 내용은 김영상 등(2008)을 참고하라.

3.1 앵커 모형 실험체 제작

모형 락 앵커 인발시험을 위해 콘크리트로 제작한 인공암반을 제작하였다. 그림 2(a)와 같이 1.2m의 강연선에 5개의 브래그 격자를 새긴 광섬유를 내장하여 스마트 강연선(직경 15.24mm)을 제작하였다. 그라우트체를 만들기 위해 그림 2(b)와 같은 플라스틱 틀을 결합한 후, 표 1과 같이 배합설계된 그라우트용 시멘트 페이스트(cement paste)를 파이프 안에 채운 후 3일간 양생한 다음, 파이프 틀을 탈형함으로써 그림 2(c)와 같은 그라우트체를 직경 4cm와 5cm의 두 종류로 제작하였다. 인발시험에 의한 그라우트-암반 접촉면에서의 변형률을 측정하기 위해 그라우트체 표면에 콘크리트 공시체에 사용되는 스트레인게이지를 부착하고 방수제 및 보호코팅제를 이용하여 보호하였다. 제작된 그라우트체를 지름이 30cm, 길이 80cm가 되는 원통형 파이프의 중앙에 위치시키고 상부에 설치되는 유압장치의 반력 및 거치대용 볼트(직경 1.0mm)를 주변에 일정한 간격으로 모형암반에 고정시켰다. 모형 암반을 제작하기 위해 표 1에 제시된 바와 같이 콘크리트를 배합하여 파이프 안에 채운 후 양생하여 그림 2(d)와 같은 락 앵커 모형을 제작하였다. 표 2는 모형 락앵커 제작시 그라우트 재료인 시멘트 페이스트와 모형암반인 콘크리트 공시체를 제작한 후, 압축강도시험을 수행하여 표 2와 같은 결과를 얻었다. 또한 압축강도로부터 국내 콘크리트 표준시방서에 의한 탄성계수와 전단탄성계수를 결정하였다.

표 1 그라우트와 모형암반의 배합설계

	W/C	단위중량(kg/m ³)					
		물	시멘트	잔골재	굵은골재	AE감수제	팽창제
그라우트	45%	579kg	1,286kg	-	-	5.144kg	12.86kg
인공암반	50%	178kg	356kg	744kg	996kg	1.424kg	-

표 2 그라우트와 모형암반의 역학적 특성

(단위 : MPa)

	압축강도(f_c)	탄성계수(E_c)	전단탄성계수(G_c)
모형암반	27.85	24800	10700
그라우트	30.50	25900	11200

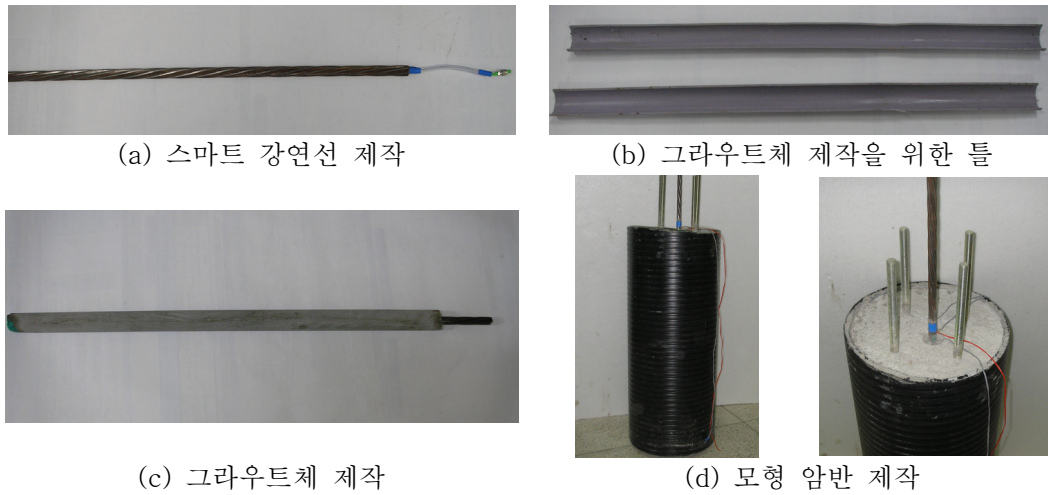


그림 2 락 앵커 모형 제작 과정

제작된 모형 락앵커의 인발시험을 위해 그림 3과 같이 볼트에 거치대를 나사로 체결하여 유압장치를 설치하였다. 강연선-그라우트의 변형률 측정은 그림 4에 나타난 바와 같이 스마트 강연선에 내장된 서로 다른 반사파장을 갖는 5개의 브래그 격자에서 측정되며 위치는 그림 4와 같다. 스마트 강연선의 FBG 센서로부터 반사파장을 측정하기 위하여 Welltech사의 FBG 인터로게이터를 사용하였다. 그라우트-암반 접촉면에서의 변형률 측정을 위하여 그라우트체를 제작한 후 상부로부터 FBG 센서위치와 동일하게 4개의 콘크리트용 스트레인게이지를 부착하였다. 또한 강연선의 상단부와 그라우트 상단부에 다이얼게이지를 설치하여 인발시 강연선과 그라우트의 뺄힘에 의한 변위를 측정하였다.

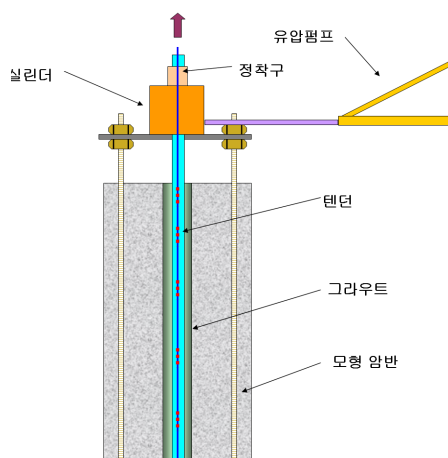


그림 3 모형 락앵커 인발장치 제작 과정

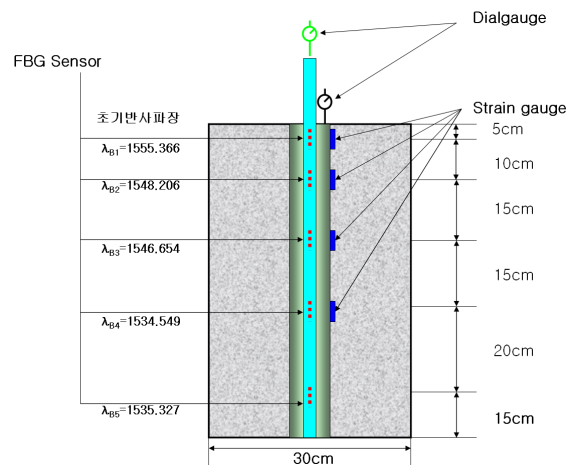


그림 4 FBG 센서의 변형률 측정 위치 및 반사파장

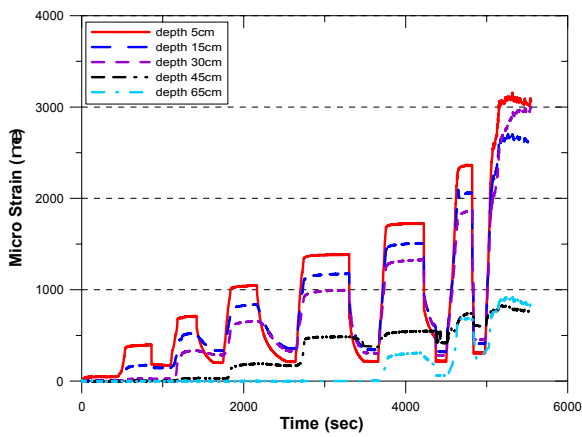
3.3 시험결과 및 분석

그라우트 직경 4cm(Anchor 1)에 대하여 모형암반에서의 락앵커 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

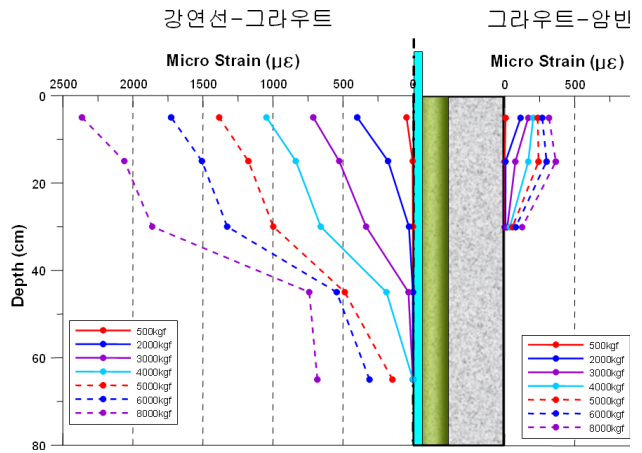
3.3.1 변형률 측정 결과

그림 6(a)에 나타난 바와 같이 스마트 강연선에 내장된 FBG 센서에서 측정된 강연선의 시간에 따른

변형률 변화이다. 그림에서 보는 바와 같이 시험이 종료될 때까지 5개의 FBG 센서가 효과적으로 강연선의 변형을 측정하였다. Anchor 1의 경우에는 그라우트 부착과괴가 발생할 때까지 강연선의 변형률을 단계하중 별로 재하(loading)와 제하(unloading)를 잘 표현함을 알 수 있다.



(a) Anchor 1(그라우트 직경 4cm)



(b) 강연선과 그라우트에서 측정된 하중별 변형률 분포(Anchor 1)

그림 6 FBG 센서로부터 측정된 시간에 따른 강연선의 변형률 분포

그림 6(b)는 Anchor 1의 스마트 강연선에서 측정된 변형률과 그라우트에 부착된 전기저항식 스트레인게이지로부터 측정된 변형률을 적용하중에 따라 깊이별로 나타낸 것이다. 낮은 하중 단계에서는 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. 낮은 하중 단계에서는 상부 5cm 깊이의 변형률이 다른 깊이에서 측정된 변형률에 비해 크게 나타나지만, 5.0tonf 이상의 하중단계에서는 15cm 깊이에서의 변형률이 가장 크게 나타나 그라우트와 암반 사이에 진행성 파괴에 의한 하중전이 현상으로 판단된다(원상연 등, 2001).

3.3.2 강연선-그라우트 접촉면에서의 전단응력 분포

강연선-그라우트 경계면에 작용하는 전단응력은 스마트 강연선에 의해 측정된 변형률을 바탕으로 식 (5)를 이용하여 계산하고 Farmer와 Aydan의 이론식으로부터 작용하중 변화에 따른 깊이별 전단응력을 산정하여 스마트 강연선의 전단응력과 비교하였다.

$$\tau_{\text{avg}} = \frac{E_t \cdot \epsilon_t}{2d} \cdot d \quad (5)$$

여기서, τ_{avg} : 두 변형률계 사이의 평균 전단응력, d : 두 변형률계 사이의 거리, ϵ_t : 두 변형률계에서 측정된 변형률 차이

그림 7에 나타난 바와 같이 이론 해들과 관측결과를 비교하면 유사한 형태를 보이지만, Aydan의 이론식과 Farmer가 제안한 이론식이 측정 결과보다 작게 나타났다. 이론식들 중에서는 Farmer가 제안한 이론식보다 Aydan의 이론식에 의해 결정된 전단응력 값과 하중 전달깊이가 더 크게 나타났으며 이러한 결과는 임경필 등(1999)과 원상연(2001)의 강봉에 대한 연구 결과와 일치한다. 이는 Farmer가 제안한 이론식은 텐던-그라우트 경계면에서 미끄러짐이 일어나지 않는다는 비현실적인 가정 하에 전단응력 분포를 제시하였기 때문으로 판단된다. 또한 원상연 등(2001)의 연구에서는 Aydan의 이론식과 앵커에서

관측되어 계산된 강봉의 실험에 의해 결정된 전단응력 분포가 거의 유사한 것으로 나타났으나 본 연구에서는 실험에 의해 결정된 전단응력 분포가 두 이론식에 비하여 결정된 전단응력 값과 하중전달 깊이가 더 크게 나타나 기존의 이론식들이 실제 강연선 주변의 하중전이를 잘 묘사하지 못하는 것으로 판단된다.

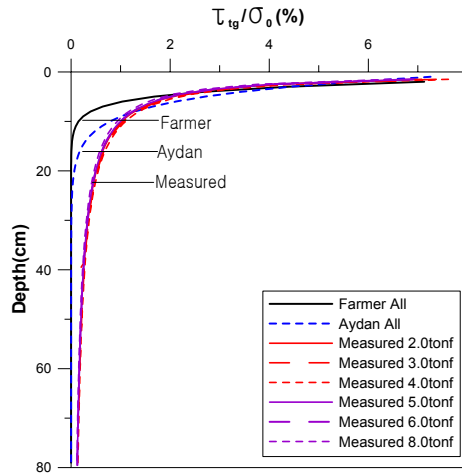


그림 7 강연선-그라우트 접촉면의 전단응력 분포

4. 결론

1. 모형 락앵커 인발시험 수행결과, 7연 강연선에 삽입된 FBG 센서들이 각 하중단계에서 길이방향 변형률 분포를 효과적으로 측정할 수 있었다.
2. 변형률 측정 결과, 각 하중단계에서는 깊이가 깊어짐에 따라 변형률이 감소하였으며 외부 작용하중의 증가에 따라 하부로 변형률 증가가 전달되어 하중의 하중전이를 확인하였다.
3. 스마트 앵커의 광섬유센서에서 측정된 변형률 분포로부터 강연선과 그라우트 접촉면에서의 전단응력을 산정하고 Farmer와 Aydan의 기존 이론식들과 비교한 결과, 기존의 이론식들이 하중증가에 따른 전달깊이의 증가와 전단응력을 과소평가하는 것으로 나타났다.

참고문헌

김래현, 이기환, 이우진, 김대규, 김낙경(2002), "현장시험에 의한 그라운드 앵커 시스템의 크리프 및 단기거동 특성 연구", **대한토목학회논문집**, 제 22권 제 6-C호, pp. Vol 18, No 3, pp. 585~594.

김영상, 서동남, 김재민(2008), "FBG 센서를 내장한 스마트 앵커의 개발과 적용", **한국지반공학회**, 봄학술 발표회.

원상연(2001), "정적 및 반복하중을 받는 락앵커의 거동", **국민대학교 박사학위논문**, pp. 5~58.

원상연, 조남준, 황성일(2001), "그라우트 락앵커의 응력 분포" **대한토목학회논문집**, 제 21권 제 3호 C 권, pp. 257~266.

임경필, 조남준, 황성일(1999), "정적 인발하중을 받는 암반 앵커의 거동: 텐던-그라우트 경계면의 전단응력 분포", **한국지반공학회논문집**, 제 15권 제 6호, PP. 143~154.

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.

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.