

전기저항식 스트랜드미터를 이용한 PSC거더 강연선의 긴장력 측정에 관한 연구

한종욱* · 이규완** · 정대성*** · 김충언****

Han, Jong Wook*, Lee, Kyu Wan**, Jung, Dae Sung***, Kim, Choong Eon****

A Study on Measurement of Prestressing Force in PSC Girder using Electrical Resistance Strand Meter

ABSTRACT

The use of strand wire in structure has been increased by the recent development of construction technologies. Until now, in spite of difficult problems in measuring strand stresses within PSC girders, indirect estimation with a load cell or accelerometer has been often used. In this paper, the electrical resistance strand meter for effective measurement of strand stresses is proposed with experiments considering material, location and thickness of sensor. The reliability and feasibility of the strand meter is enhanced through the experiment with 29.9m PSC girder.

Key words : Prestressing, Electric resistance, Strand meter, Strain gage, Reliability

초록

최근 건설기술이 발전함에 따라 강연선을 이용한 구조물 시공이 증가하고 있는 추세이다. 현재 강연선의 긴장력 계측을 위한 방법으로는 로드셀과 가속도계를 이용한 간접 추정방식을 주로 이용하고 있다. 그러나, 강연선이 PSC거더 내부에 삽입되어 시공되는 경우에는 장력측정에는 많은 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 강연선의 긴장력을 효과적으로 계측하기 위해 전기저항식 스트랜드미터를 개발하였다. 변형률 센서 부착 위치별, 스트랜드미터의 두께와 재료에 따른 영향을 실험을 통해 검토하여 최적의 스트랜드미터를 제안하였다. 또한, 29.9m의 PSC거더에 대한 실규모 검증실험을 수행하여 현장 적용성을 평가한 결과, 하중-변형률의 신뢰도가 높게 평가되었다.

검색어 : 긴장력, 전기저항식, 스트랜드미터, 변형률 센서, 신뢰도

1. 서론

최근 건설기술이 발전함에 따라 강연선(strand)을 이용한 구조물 시공이 점차 증가하고 있어 구조물은 점차 대형화 및 장대화되고 있다. 강연선은 인장력을 전달하는 부재로써 일반철근의 인장강도에 비해 고강도 강연선을 사용하기 때문에 인장강도가 매우 높고, 장기간 내구성을 유지할 수 있다. 또한, 강연선은 시공시 매우 유연하여 곡선 배치가 용이하기 때문에 교량에서는 주로 PSC (prestressed concrete) 거더의 긴장재 및 케이블 교량 등에 쓰이며, 지반분야에서는 흙막이 공사, 사면안정 및 기초 등의 앵커에 많이 사용되고 있다.

* 정회원 · 교신저자 · 건설연구인프라운영원 실장, 공학박사 (Corresponding Author · KOCED Collaboratory Management Institute · jwhan@mju.ac.kr)

** 정회원 · (주)카이센 기업부설연구소 대표이사, 공학석사 (KAISEN, Inc. · kai@kaisen.co.kr)

*** 정회원 · 건설연구인프라운영원 실장, 공학박사 (KOCED Collaboratory Management Institute · dsjung@mju.ac.kr)

**** 정회원 · (주)삼현피에프 기술연구소 팀장, 공학박사 (Samhyun P.F co., Ltd. · slmania@hanmail.net)

Received September 15, 2014/ revised October 19, 2014/ accepted November 13, 2014

강연선을 PSC거더 내부에 긴장대로 사용하는 경우에는 구조물의 자중 및 외력에 저항할 수 있는 저항력을 발생시키는 역할을 함으로 구조적 안전성에 중요한 영향을 미치는 주 재료가 된다. 강연선 긴장시 하중-변형 거동은 설계에서 가정된 거동과 동일하게 거동되어야 하며 장기간 PSC거더의 거동과 같이 하기 때문에 구조물에 미치는 영향이 크다. 이러한 강연선은 외관상으로 노출이 되지 않고 PSC거더 내부에 배치되기 때문에 단단계 긴장에 따른 강연선의 장력 상태, 유지 및 감소 등을 모니터링하기에는 한계를 가지고 있다. 따라서 PSC거더의 전반적인 안전성을 예측하기에는 거의 불가능한 상태이다. 건설분야도 기술발전에 따라 PSC거더 강연선의 상태를 정량적이고 객관적으로 모니터링할 수 있는 기술 개발이 시급하다.

현재 강연선의 긴장력 계측 및 안전감시를 위한 방법으로는 로드셀(load cell)을 이용한 방법과 가속도계(accelerometer)를 이용한 간접 추정방식이 주를 이루고 있다. 로드셀을 이용한 방식은 로드셀이 하중을 받으면 발생하는 변형량을 변형측정장치가 전기 신호를 발생하여 측정하는 방식으로 일반적으로 다수의 강연선을 일체긴장시 많이 사용하지만 다수의 강연선이 배치됨에 따른 편심에 의한 측정오차가 크게 발생될 수 있는 단점이 있다. 또한, 개별 강연선의 긴장상태를 계측할 수 없다는 한계가 있다. 가속도계를 사용하는 방식은 사강교 및 현수교 등의 외부 케이블 장력 측정을 위한 방법으로 많이 사용한다. 케이블의 장력계산은 고유진동수를 이용한 방법으로 추정오차가 존재하며 시스템 가격이 상대적으로 고가이다. 또한, PSC거더와 같이 강연선이 콘크리트 내부에 삽입 및 그라우팅이 처리된 경우에는 장력 측정이 불가능하다.

최근에는 스트레인게이지 센서를 활용한 문제점을 보완하기 위하여 광섬유센서(FBG)를 적용한 계측 방법들이 많이 연구되고 있다(Gu et al., 2001; Kim, 2007; Lee, 2012; Calvert et al., 2004; Li et al., 2005; Ren et al., 2005). 구조물에 사용되는 강연선의 긴장력 계측을 위하여 강연선의 심선(core wire)에 중공홀을 생성한 후 광섬유센서를 삽입하여 긴장력 계측을 하는 연구가 진행되었다(Kim et al., 2008; Kim et al., 2009; Sung et al., 2012). 이 기법은 축방향의 긴장력을 안정적으로 측정할 수 있는 장점이 있으나 강연선의 심선을 중공한 후 광섬유센서와 고착제 삽입문제, 온도보정을 위한 추가 센서 설치, 장기간 계측을 위한 제작 및 커넥터 연결 등을 위한 광케이블 노출작업에 어려움이 있다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 강연선 외부에 탈부착이 가능한 전기저항식 스트랜드미터(strand meter)를 개발하였다. 스트랜드미터는 탈부착이 용이한 구조로 설계되어 현장 설치가 용이하고 센서일체형으로 구성됨으로 내구성이 강하고 크기와 질량이 작기 때문에 구조물의 긴장력 계측에 용이하다.

스트레인 측정범위도 강연선 긴장시 강연선이 항복할 때까지 측정이 가능하다. 이에 스트랜드미터를 이용하여 실제 강연선의 긴장력 측정 가능성 및 정확성을 확인하기 위하여 29.9m PSC거더에 적용하여 전기저항식 스트랜드미터의 성능에 대한 검증실험을 수행하였다.

2. 전기저항식 변형률 센서의 긴장력 측정

현재 일반적으로 사용하는 전기저항식 변형률 센서(Electric Resistance Strain Gage, EG)를 이용하여 강연선의 긴장력 측정 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 강연선은 Fig. 1과 같이 단면이 7연선으로 이루어진 PS강연선($\varnothing 15.2\text{mm}$)으로 중앙에 1개의 심선을 중심으로 6개의 강선이 배치되었다. 길이방향으로는 심선을 중심으로 6개의 강선이 나선형으로 배치되어 강연선의 꼬인 각은 $7\sim 9^\circ$ 를 유지하게 된다.

실험체 셋팅은 Fig. 2와 같이 UTM (Universal Test Machine)에 강연선 상하부를 앵커헤드와 췌기로 구속한 상태에서 인장하중이

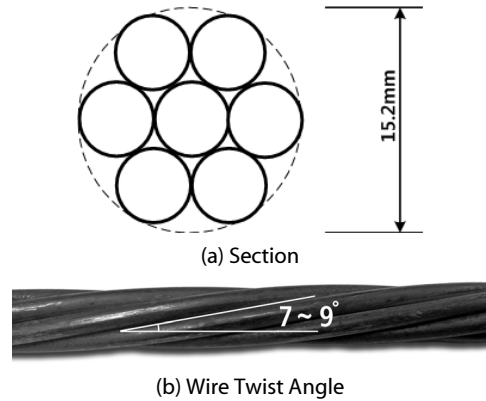


Fig. 1. Properties of Strand

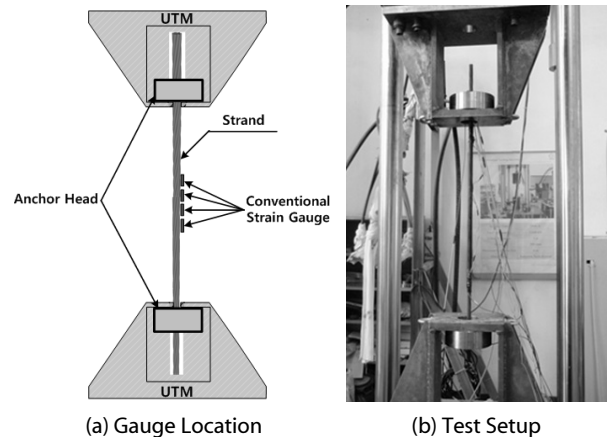
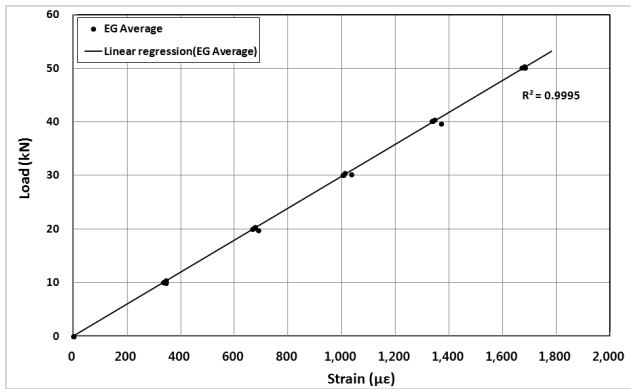
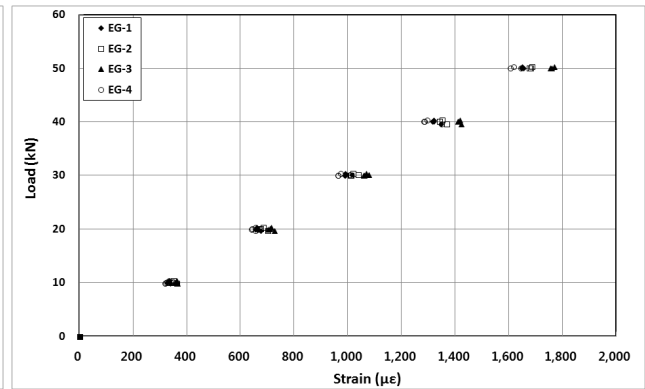


Fig. 2. Measurement of Strand Stress



(a) Analysis of Average Strains



(b) Measuring Results

Fig. 3. Results of Strand Stress by Electrical Resistance Strain Gauges

가해지도록 셋팅하고, 전기저항식 변형률 센서를 강연선 표면 중앙 부에 꼬인 각에 따라 사선으로 4개를 설치하였다. 하중은 0~50kN 까지 10kN씩 증가시키면서 3회 반복 실험을 수행하였다.

강연선에 전기저항식 변형률 센서를 부착하여 실험을 수행한 후, Fig. 3(a)와 같이 인장실험 계측결과를 케이스별로 평균하여 분석한 결과, 하중에 따라 선형적인 응답특성이 나타났다. 선형회귀식의 결정계수(R^2)는 0.9995로 평가되었다. 전기저항식 변형률 센서를 이용한 강연선 긴장력 측정은 가능하다고 판단된다. 그러나, Fig. 3(b)와 같이 최대하중이 약 50kN에서 변형률의 전체적인 분포가 1,600~1,760 $\mu\epsilon$ 범위로 넓게 분포되었고, 케이스별 변형률의 상대적인 차이도 최대 약 150 $\mu\epsilon$ 정도 발생함을 알 수 있다. 이러한 변형률의 차이는 강연선이 중앙에 배치된 심선을 중심으로 6개의 강선이 나선형(7~9°)으로 배치되기 때문에 변형률 센서를 사선으로 설치할 수밖에 없는 데서 기인하는 불가피한 결과라고 판단된다. 변형률 차이는 선형적이기 때문에 하중이 증가할 수록 차이가 더 커질 것으로 판단된다.

3. 스트랜드미터 개발 및 실내검증실험

3.1 스트랜드미터의 특징

강연선 표면에 전기저항식 변형률 센서를 사선으로 직접 부착하는 방식보다 측정값의 정확성과 작업의 편리성을 확보할 수 있는 스트랜드미터를 개발하였다. 스트랜드미터의 모양은 Fig. 4와 같고, 제원은 길이가 150mm에 단면은 25mm×25mm로 제작하였다. 스트랜드미터와 강연선과의 부착을 고려하여 양단에 고정용 볼트를 설치하여 스트랜드미터의 응답 재현성을 확보할 수 있도록 하였다. 스트랜드미터의 본체는 센서일체형 스프링구조이고 표면에는 전기저항식 변형률 센서를 설치함으로써 센서일체형 패키징으로 구성되기 때문에 내구성이 매우 우수하다. 스트랜드미터를 강연

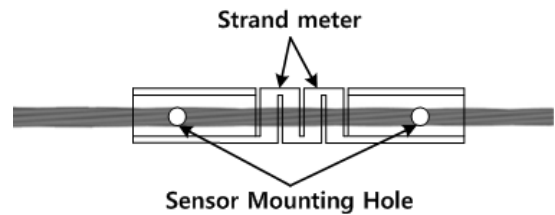


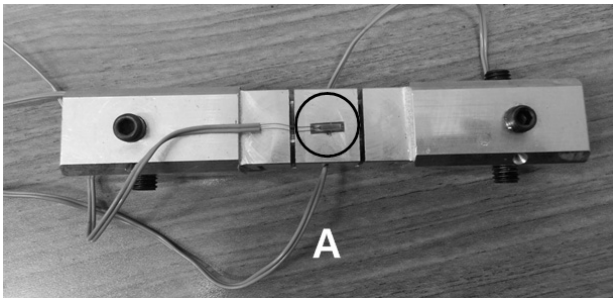
Fig. 4. Strand Meter

선에 삽입한 후 강연선에 고정시키면 스트랜드미터는 강연선과 일체화됨을 할 수 있도록 되어 있고, 전기저항식 기반의 센서 시스템이기 때문에 현재 사용되는 계측장비를 이용하여 측정이 가능하다. 또한, 강연선이 항복할 때까지 측정이 가능한 스트레인 측정범위를 확보하고 있기 때문에 기술적인 제약이 없어 원형단면 기반의 건설용 부재의 계측에 활용 가능한 구조이다.

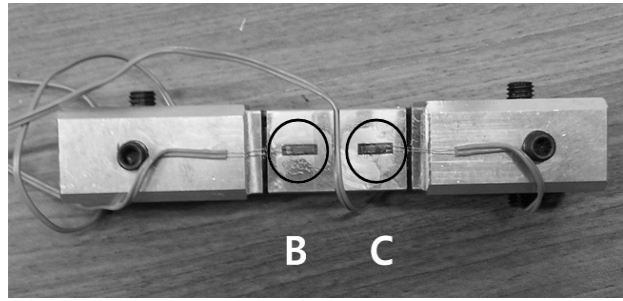
3.2 스트랜드미터의 검증실험

스트랜드미터를 개발하기 위하여 센서 부착위치(A, B, C), 두께별(1/3t, 2/3t) 및 재료별(M1, M2) 특성을 고려하여 실험체를 제작하였다. 스트랜드미터를 최적화하기 위하여 센서 부착위치, 두께 및 재료별 특성에 따른 상호 민감도를 분석하고 분해능을 파악하기 위하여 검증실험을 수행하였다(Figs. 5, 6 and 7). 두께는 양단과 동일한 두께를 t로 가정하고 스트랜드미터의 두께가 1/3과 2/3두께를 대상으로 하였고, 재료는 기준 알루미늄(M1)과 기준 알루미늄 대비 고강도 알루미늄(M2)을 대상으로 하였다.

새롭게 개발된 스트랜드미터의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 8과 같이 실험셋팅을 하였다. 실험용 프레임에 설치한 후에 강연선(∅15.2mm) 중앙부에 스트랜드미터를 설치하였다. 강연선을 긴장하기 위하여 프레임 우측 데드엔드(dead end) 방향에는 쇠기로 구속하고, 좌측 라이브엔드(live end) 방향에는 로드셀과 유압실린

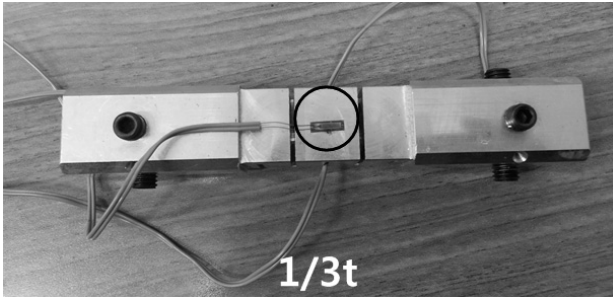


(a) Location of Sensor A

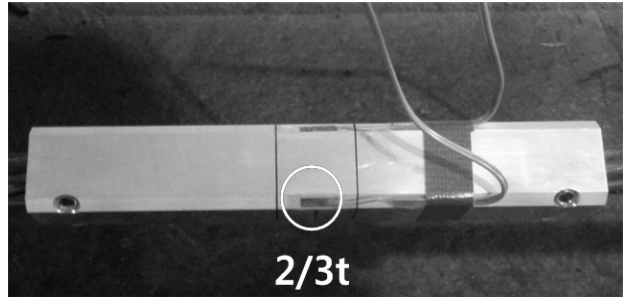


(b) Locations of Sensor B and C

Fig. 5. Strand Meters by Locations of Sensors

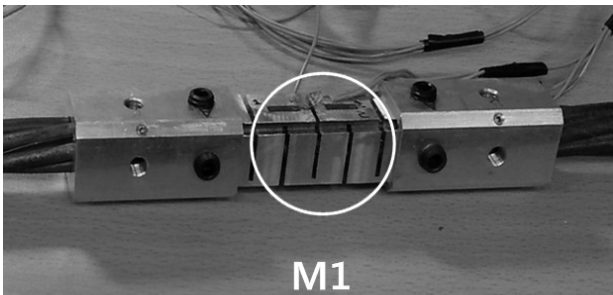


(a) Measuring Location of $1/3t$

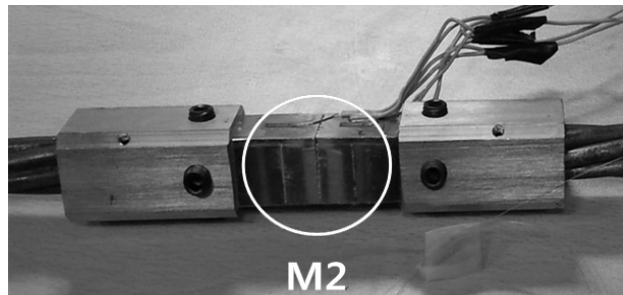


(b) Measuring Location of $2/3t$

Fig. 6. Strand Meters by Thickness



(a) Measuring Location of M1



(b) Measuring Location of M2

Fig. 7. Strand Meters by Material



Fig. 8. Experimental Test of Prototype Strand Meter in Laboratory

더를 설치한 후에 췌기로 구속하여 셋팅 하였다. 편심이 발생하지 않도록 강연선, 로드셀과 유압실린더는 축방향과 일치하도록 배치 하였다. 실험셋팅이 완료 후에는 로드셀을 이용하여 약 190kN까지 강연선에 긴장력을 도입하였고, 성능실험은 3회 반복하였다.

3.3 스트랜드미터 검증실험 결과

3.3.1 센서 위치별 실험결과

스트랜드미터에 전기저항식 센서의 최적 부착위치(A, B, C)를 선정하기 위해 약 190kN까지 긴장실험을 수행한 결과, 로드셀

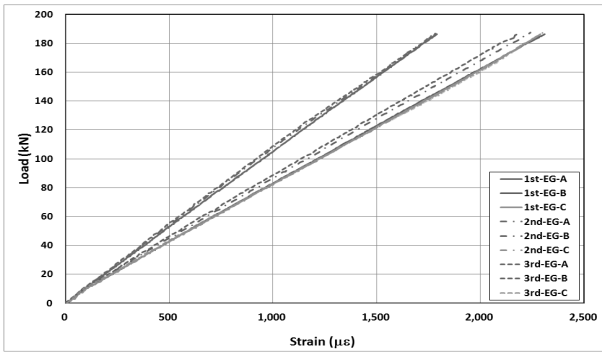


Fig. 9. Responses of Strand Meters by Location

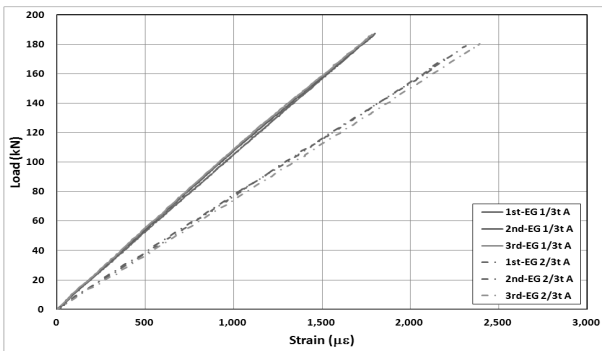


Fig. 10. Responses of Strand Meters by Thickness (Location A)

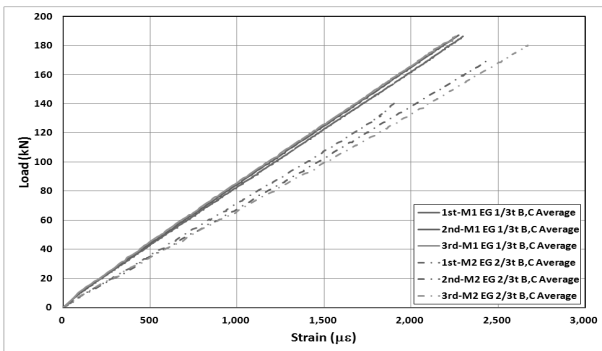


Fig. 11. Responses of Strand Meters by Thickness (Location B and C)

하중에 따른 변형을 응답값은 Fig. 9와 같이 선형적으로 나타났다. 센서 부착 위치별로 변형을 응답값은 차이가 있으나 선형적인 상관성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

최대변형률은 A위치는 약 $1,700\mu\epsilon$, B와 C 위치에서는 약 $2,300\sim 2,400\mu\epsilon$ 이 측정되어 센서의 민감도는 A보다는 B와 C위치가 더 높은 것으로 평가되었다. 3회 반복 실험시 재현성은 B위치보다는 A와 C위치에서 높은 것으로 분석되었다.

3.3.2 두께별 실험 결과

스트랜드미터에 전기저항식 센서가 부착되는 단면 두께(1/3t, 2/3t)를 변수로 실험한결과, 스트랜드미터의 응답은 Figs. 10 and 11과 같이 전체적으로 선형적으로 나타났다.

스트랜드미터 두께에 따른 최대변형률 응답값은 1/3t 보다는 2/3t일 때 변형을 응답값이 A위치에서는 약 $600\mu\epsilon$ (Fig. 10), B와 C 위치에서도 약 $350\mu\epsilon$ (Fig. 11)정도 더 크게 계측 되었다. 동일한 하중이 인가되었을 때, 스트랜드미터 응답값에 두께가 중요한 요인으로 작용됨을 실험적으로 확인하였다.

3.3.3 재료별 실험 결과

스트랜드미터의 재료(M1, M2)를 변수로하여 실험한결과, 스트랜드미터의 응답은 Figs. 12 and 13과 같이 전체적으로 선형적으로

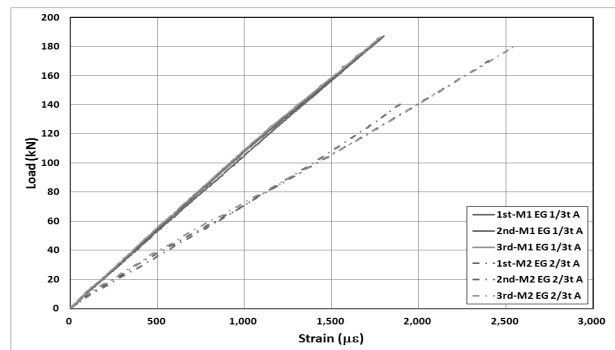


Fig. 12. Responses of Strand Meters by Material (Location A)

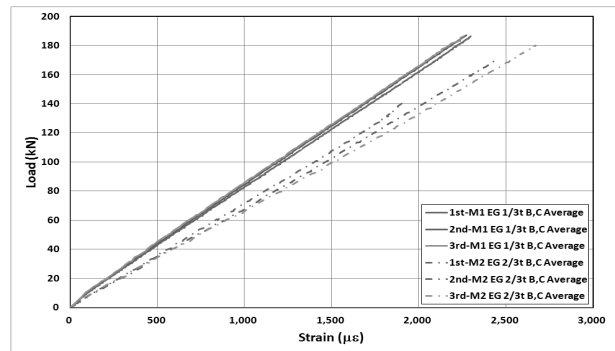


Fig. 13. Responses of Strand Meters by Material (Location B and C)

나타났다.

스트랜드미터의 최대변형률은 M1재료는 A위치에서는 약 $1,800\mu\epsilon$, B와 C위치에서는 약 $2,300\mu\epsilon$ 이고, M2재료는 A위치에서는 약 $2,500\mu\epsilon$, B와 C위치에서는 약 $2,700\mu\epsilon$ 로 계속이 되었다. 재료에 따른 스트랜드미터의 변형률은 M1보다는 M2가 더 크게 계속이 되었다. 하지만 응답값의 선형성 및 재현성을 M2 보다는 M1이 상대적으로 우수한 것으로 판단되었다.

스트랜드미터에 대한 검증실험결과 센서의 부착위치 및 스트랜드미터의 두께와 재료 특성이 하중응답에 대한 중요한 요소임을 알 수 있다. 이와 같은 요소를 고려하여 최적의 스트랜드미터 센서를 설계하였다.

4. 실규모 검증실험

스트랜드미터 시작품을 사용한 실규모 검증실험을 수행하기 위해, Fig. 14와 같은 길이 29.9m 역 더블T형 PSC거더(RDT 거더)를 대상으로 실험을 수행하였다. 스트랜드미터 시작품에 전기식 센서 2개를 부착하여 제작하였다. 검증실험에 사용한 스트랜드미터($25\text{mm}\times 25\text{mm}\times 150\text{mm}$)는 Fig. 4와 같고, 그라우팅에 의한 구속효과를 차단하며 스트랜드미터 내부 스프링구조를 보호하기 위하여 별도의 커버를 부착하여 설치하였다.

스트랜드미터는 실험체의 데드엔드부 하부텐던(T3)에 설치하였다(Fig. 14). 이 텐던에는 7연선으로 이루어진 PS강연선($\phi 15.2\text{mm}$) 15가닥이 설치되었는데 스트랜드미터 시작품은 이중상부 강연선 1가닥 끝단에 설치하였다(Figs. 15(a) and 15(b)).

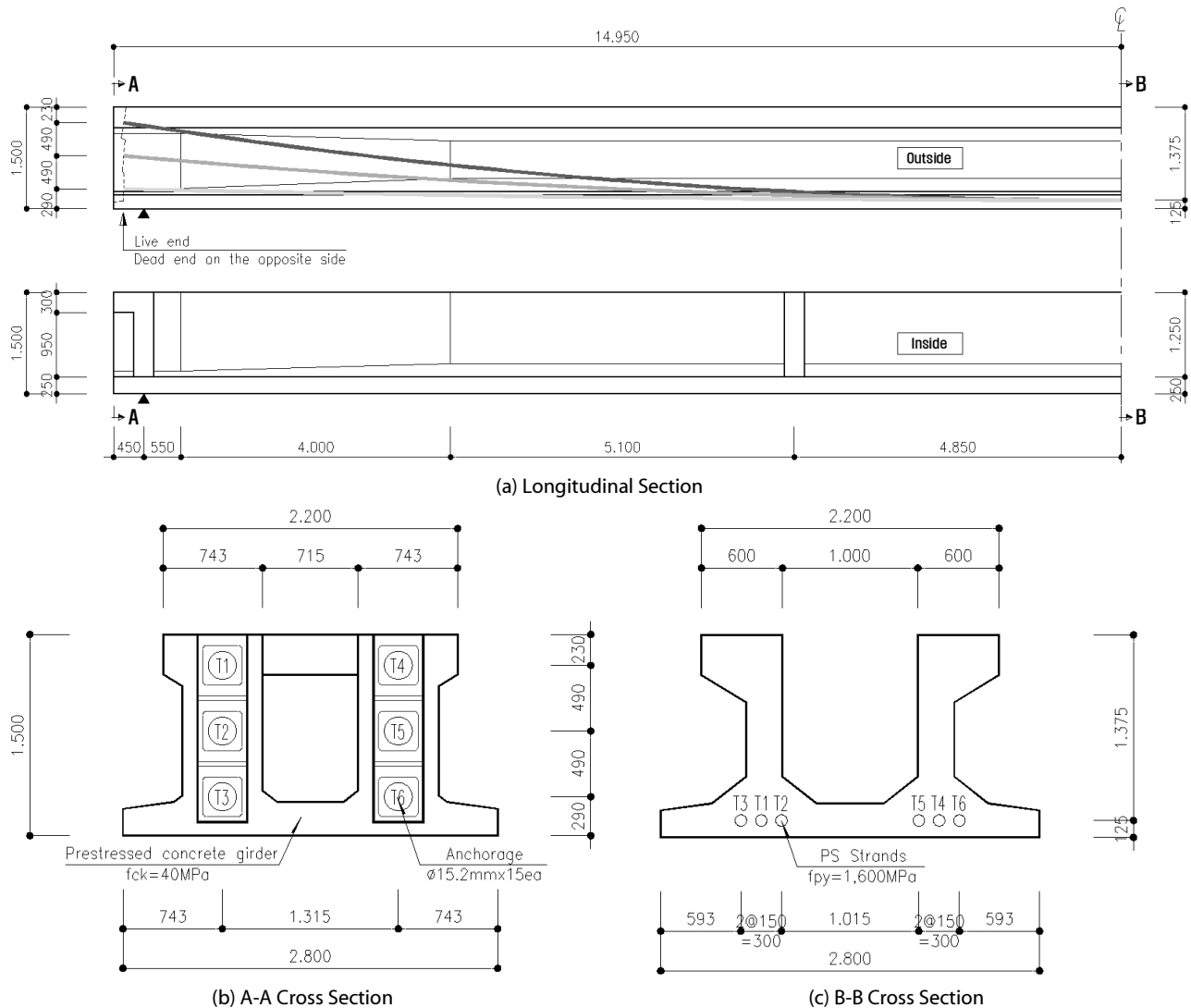


Fig. 14. PSC Girder Specimen

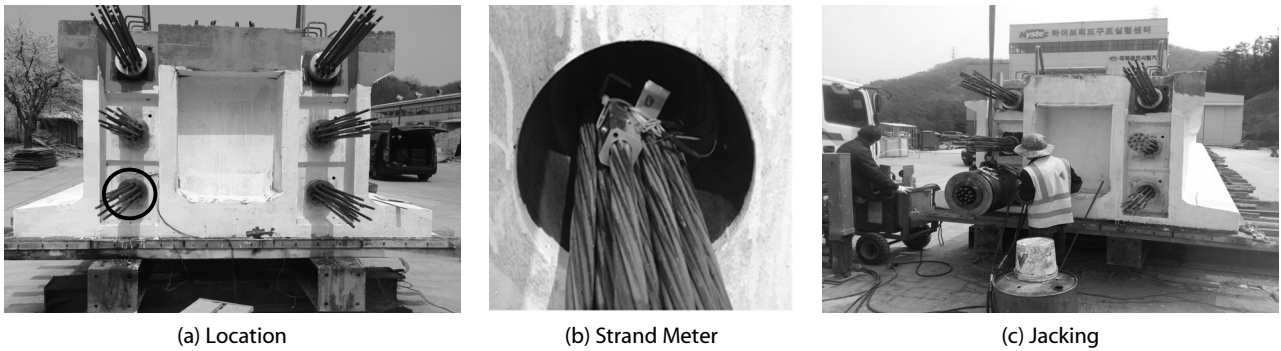


Fig. 15. Installation of Strand Meter

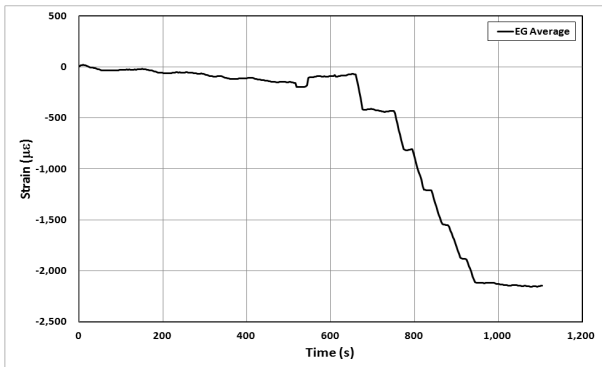


Fig. 16. Response of Strand Meter Due to Prestressing

Table 1. Comparison between Jacking Pressure and Estimated Pressure

Jacking Pressure (bar)	Strand Meter			
	Strain (μϵ)	Increment (μϵ)	Estimated Pressure (bar)	Relative Error (%)
0	0	0	0	0
100	-350	-350	98	2.0
200	-733	-383	205	2.6
300	-1,125	-392	314	5.0
400	-1,462	-337	409	2.3
500	-1,800	-338	503	0.8
570	-2,036	-236	570	0.0

실험체의 긴장력 도입은 0bar에서 500bar까지는 100bar씩 증가시켰고, 최대긴장력은 570bar까지 도입하였다. 계측은 긴장시작 후 해당 텐던의 초기부터 단계별 긴장력과 긴장완료까지 측정을 수행하였다.

긴장력 도입에 따른 시간에 대한 전기식 스트랜드미터 시작품 응답은 Fig. 16과 같이 나타났다. 초기에는 강연선이 약간의 압축력을 받다가 긴장력이 도입되는 약 650초 이후부터는 긴장력 도입

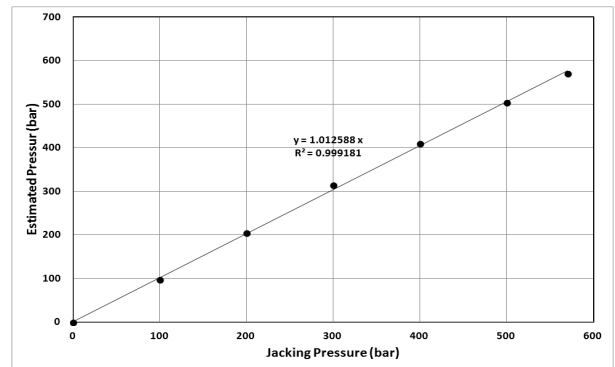


Fig. 17. Results of Electrical Resistance Strand Meter in the Experiment

순서대로 계단형태로 변형률이 선형적으로 증가됨을 알 수 있다.

인가압력과 스트랜드미터의 응답값에 대한 분석결과, Table 1과 같이 단계별로 100bar의 인가압력이 작용하면 스트랜드미터의 변형률은 평균 $-360.0\mu\epsilon$ (편차 $-25.8\mu\epsilon$)가 발생하였다. 또한, 인가압력과 추정압력에 따른 압력의 상대적 오차는 최대 5.0% (평균 1.4%)이내로 작게 발생하였다. 추정압력은 스트랜드미터 측정변형률에 환산계수를 곱하여 계산하였다.

또한, 스트랜드미터의 계측결과를 선형 상관성 분석결과(Fig. 17) 상관계수(R^2) 값은 0.9991로서 인가압력과 추정압력이 높은 상관관계를 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

실험결과 전기식 스트랜드미터 시작품이 손상되지 않고 긴장력 측정이 가능한 것을 실험적으로 검증하였으며 계측응답값도 선형 상관관계가 우수하게 평가되었다.

5. 결론

본 연구에서는 강연선에 대한 긴장력 감시 및 계측을 위하여 표면에 전기식 변형률 센서를 설치하여 센서일체형 스프링구조로 구성된 전기식 스트랜드미터를 개발하였으며, 살내 및 살규모 거더

실험에 적용하여 성능을 검증하였다.

- (1) 강연선 표면에 사선으로 전기식 변형률 센서를 부착한 예비시험 결과, 하중에 따른 응답특성이 선형성은 보였으나, 강연선이 나선형으로 배치하는 특성상 하중 증가에 따른 변형률의 차가 상대적으로 크게 발생하였다.
- (2) 전기식 스트랜드미터 시제품 개발을 위해 센서 설치위치, 스트랜드미터의 두께 및 재료별 특성을 고려하여 실내 검증시험을 실행한 결과, 하중에 따른 변형률의 응답은 선형적으로 나타났다. 센서 설치위치에 따른 최대변형률의 영향은 A위치보다는 B와 C 위치가 약 1.35배 크게 측정되었다. 스트랜드미터의 두께와 재료에 따른 최대변형률의 영향은 두께가 증가할수록, 재료가 고강도일수록 변형률은 크게 나타났다. 스트랜드미터의 두께와 재료에 따른 계측위치별 변형률의 특성은 A위치에는 영향이 크지만, B와 C위치에서는 상대적으로 작게 발생하였다. 이러한 실험 결과로부터 최적화된 전기식 스트랜드미터 구조를 개발하였다.
- (3) 실규모 검증시험을 실시한 결과, 인가압력과 추정압력의 상대적인 압력차는 평균 1.4%로 작게 발생하였고, 선형상관계수 ($R^2=0.9991$)도 높게 평가되어 선형적인 긴장력 측정이 가능함을 실험적으로 검증되었다.
- (4) 전기식 스트랜드미터는 크기도 작고, 내구성이 좋아 건설분야의 다양한 구조물계측용으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 국토해양부의 건설기술혁신사업(12-기술혁신B03) 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Calvert, S. and Mooney, J. (2004). "Bridge structural health monitoring system using fiber grating sensors development and preparation for a permanent installation." *SPIE Proceeding*, 5391, pp. 61-71.
- Gu, H. B. and Back, Y. (2001). "Development landslide measurement technique using an optical fiber sensor." *Korea Institute of Civil Engineering*.
- Kim, J. M., Kim, H. W., Kim, Y. S., Kim, J. W. and Yun, C. B. (2008). "A methodology for monitoring prestressed force of bridges using OFS-embedded strand." *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 21, No. 3, pp. 287-294.
- Kim, K. S. (2007). "Smart monitoring of civil infrastructures using fiber optic sensors." *The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 55, No. 4, pp. 81-91.
- Kim, Y. S., Suh, D. N., Kim, J. M. and Sung, H. J. (2009). "Load transfer characteristics of the 7-wire strand using FBG sensor embedded smart tendon." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 3, pp. 79-86.
- Lee, K. W. (2012). "Development of FBG accelerometer and field application test." *Proceeding of Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 2, pp. 79-80.
- Li, E., Xi, J., Chicharo, J., Liu, T., Li, X., Jiang, J. L., Wang, Y. and Zhang, Y. (2005). "The experimental evaluation of FBG sensor for strain measurement of prestressed steel strand." *SPIE Proceeding*, 5649, pp. 463-469.
- Ren, L., Li, N. H., Sun, L. and Li, D. S. (2005). "Development of tube-packaged FBG strain sensor and application in the vibration experiment of submarine pipeline model." *SPIE Proceeding*, 5770, pp. 193-204.
- Sung, H. J., Kim, Y. S., Kim, J. M. and Park, G. H. (2012). "Tension force monitoring of tension type ground anchor using optical FBG sensors." *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 32, No. 5, pp. 42-45.