

FBG 센서를 이용한 강연선 전달길이 측정

이 성 철¹ · 최 송 이² · 신 경 준³ · 김 재 민² · 이 환 우^{4*}

¹국제원자력대학원대학교 원자력산업학과, ²전남대학교 해양토목공학과, ³충남대학교 토목공학과, ⁴부경대학교 토목공학과

Measurement of Transfer Length for a Seven-Wire Strand with FBG Sensors

Seong-Cheol Lee¹, Song-Yi Choi², Kyung-Joon Shin³, Jae-Min Kim² and Hwan-Woo Lee^{4*}

¹Department of NPP Engineering, KEPCO International Nuclear Graduate School, Ulsan, 45014, Korea

²Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam National Univ., Yeosu, 59626, Korea

³Department of Civil Engineering, Chungnam National Univ., Daejeon 34134, Korea

⁴Department of Civil Engineering, Pukyong National Univ., Pusan, 48513, Korea

Abstract

In this paper, an experimental program has been conducted to investigate transfer length in high strength concrete members pretensioned through a seven-wire strand with FBG sensors. To measure transfer length, five members were fabricated, which had a length of 3 m and a cross-section of 150×150mm. It was measured that the concrete compressive strength was 58MPa at pretensioning. Test results indicated that more precise and reliable measurement on the transfer length was attained with FBG sensors than conventional gauges attached on concrete surface. Through comparing the measured transfer length and predictions, applicability of several transfer length models in literature was investigated. This paper can be useful for relevant research field such as investigation on the bond mechanism of a seven-wire strand in concrete members.

Keywords : smart tendon, FBG sensor, pretension, transfer length

1. 서 론

프리텐션 부재에서는 프리스트레스가 도입된 강연선의 힘이 콘크리트로 전달되는 구간이 강연선 정착 단부로부터 발생하게 되며, 정착 단부로부터 콘크리트에 유효 프리스트레스가 발생하는 곳까지의 거리를 전달길이(transfer length)라고 한다(ACI 318-11, 2011). 전달길이 구간 내에서는 강연선과 콘크리트 사이의 부착으로 인해 콘크리트에 도입되는 유효 프리스트레스가 변화하게 되며, 따라서 프리텐션 부재의 정착구 부근에서의 응력 분포를 예측하고 향후 프리텐션 부재의 설계에 필수적으로 고려되어야 하는 강연선 정착 길이(development length)를 결정하는데 전달길이의 산정은 매우 중요한 요인이다(Barnes *et al.*, 2006).

프리텐션 부재에서의 전달길이를 측정하기 위해 데믹게이

지, 콘크리트 표면 또는 강연선에 부착하는 전기저항식 게이지 등 많은 방법들이 여러 연구자들(Zia and Mostafa, 1977; Mitchel *et al.*, 1993; Russell and Burns, 1997; Oh and Kim, 2000; Park *et al.*, 2012)에 의해 시도되어 왔다. 하지만, 데믹게이지의 경우 측정 결과의 신뢰성이 떨어지고, 콘크리트 표면에 부착하는 게이지의 경우 시공 오차 등으로 발생하는 부재의 편심에 의한 영향이 있으며, 강연선에 부착하는 전기저항식 게이지의 경우 강연선 고유의 부착 성능이 게이지에 영향을 받아 전달길이와 실제와 달라질 우려가 있는 등 아직까지 확실한 전달길이 측정 방법이 개발되어 있지 않은 실정이다.

최근들어 강연선의 긴장력을 측정하기 위해 FBG 센서를 활용한 기법이 활발히 연구되고 있다(Udd, 1996; Lau, 2003; Ren *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2008; 2010; 2012). FBG

* Corresponding author:

Tel: +82-51-629-6073; E-mail: hwanwoo@pknu.ac.kr
Received October 26 2015; Revised November 24 2015;
Accepted November 25 2015

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

센서를 활용할 경우 공용 중 강연선 긴장력을 손쉽게 계측할 수 있을 뿐만 아니라, 강연선의 전달길이 측정 시 표면 부착 매립형 게이지와 달리 강연선과 콘크리트 계면에서의 부착 성능에 전혀 영향을 미치지 않는 장점이 있다.

한편, 고강도 콘크리트 부재에서의 강연선 전달길이와 관련하여 현행 설계기준(ACI 318-11, 2011)과 기존 이론 모델들(Zia and Mostafa, 1977; Balazs, 1992; Mitchell *et al.*, 1993; Park and Cho, 2014)과의 차이가 큰 것으로 알려져 있다. 특히 현행 설계기준에서는 전달길이에 대한 콘크리트 강도의 효과가 반영되지 않아 추가 연구가 필요한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 FBG 센서를 활용하여 실험을 통해 고강도 콘크리트 부재에서 강연선에 대한 전달길이를 측정하고자 한다.

2. 기존 강연선 전달길이 모델

프리텐션 콘크리트 부재에 대해 ACI 318-11에서 제시하고 있는 전달길이 산정식을 비롯하여 1970년대부터 최근까지 여러 연구자들에 의해 제시된 주요 전달길이 모델들을 Table 1에 요약하였다. 표에서 보는 바와 같이 현재 설계에 적용되고 있는 ACI 318-11이 제시하고 있는 전달길이 모델에서는 강연선의 응력과 지름 등 두 가지 요소만 고려하고 콘크리트 압축강도의 영향이 고려되지 않은 반면 다른 연구자들이 제시한 전달길이 모델에서는 콘크리트 압축강도의 영향까지 추가하여 고려한 것을 확인할 수 있다. 비교를 보다 명확히 하기 위해 콘크리트 단면 150×150mm에 콘크리트 타설 후 10일 뒤 15.2mm 강연선을 인장강도의 약 60%로 긴장한 가상의 프리텐션 부재를 대상으로 콘크리트 강도의 변화에 따라 기존의 모델들이 예측하는 강연선의 전달길이들

Table 1 Transfer length model for a pretensioned tendon

Reference	Transfer length model for a pretensioned tendon
ACI 318-11	$L_t = \frac{f_{sc}}{21} d_b$
Zia and Mostafa, 1977	$L_t = 1.5 \frac{f_{si}}{f_{ci}} d_b - 116.84$
Balázszs, 1992	$L_t = d_b K_1 \sqrt[5]{\frac{f_{sc}^3}{f_{ci}^2}}$
Mitchell <i>et al.</i> , 1993	$L_t = 0.048 f_{sc} d_b \sqrt{\frac{20}{f_{ci}}}$
Park and Cho, 2014	$L_t = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1(a_3 - \epsilon_{pr})}}{2a_1}$ where $a_1 = \frac{a_0 \pi}{600} \frac{f_{ci}'}{E_p A_p} \frac{\epsilon_{pr}}{\epsilon_{pr} - \epsilon_{cl}}$, $a_0 = 1.0, a_2 = \frac{\pi d_p}{E_p A_p} (0.055 f_{ci}')$

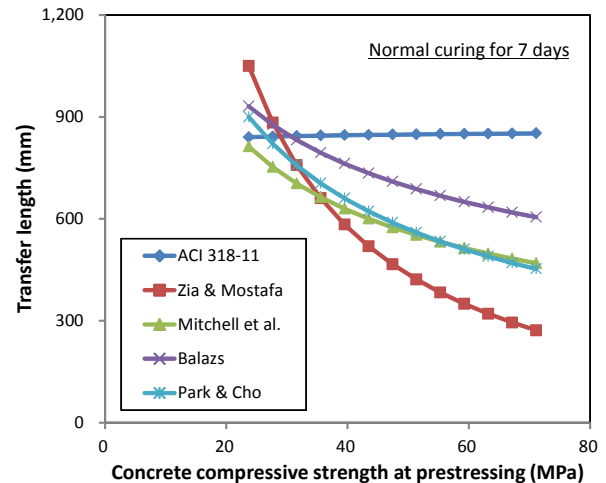


Fig. 1 Comparison of transfer length models for a seven-wire strand

을 Fig. 1에 나타내었다. 참고로 고려된 재령에 따른 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수의 발현은 콘크리트 구조기준(2012)에 제시된 일반 양생의 경우를 참조하였다. 그림에서 보는 바와 같이 ACI 318-11의 경우 콘크리트 압축강도가 증가하더라도 전달길이가 850mm 내외로 거의 일정하게 예측되는 반면 다른 모델들의 경우 콘크리트 압축강도가 증가할수록 전달길이가 급격히 감소하는 것으로 예측되었다. 또한, 긴장 시 콘크리트 압축강도가 40MPa 이상으로 고강도일 경우 기존 연구자들이 제시한 모델들이 예측한 전달길이에서 편차가 상당히 큰 것으로 나타났다. 따라서, 교량 및 고층 건물 등에 적용되는 콘크리트의 압축강도가 점점 증가하는 추세를 고려할 때, 고강도 콘크리트를 적용한 프리텐션 부재에서의 강연선 전달길이에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

3. FBG를 이용한 강연선 전달길이 측정 실험

3.1 실험 개요

고강도 콘크리트 부재에서의 강연선 전달길이 측정을 위해 Fig. 2에서 보는 바와 같이 콘크리트 단면 150×150mm, 길이 3,000mm인 시험체를 총 5개를 제작하였으며, 각 시험체의 단면 가운데에 FBG 센서가 기입된 15.2mm 스마트

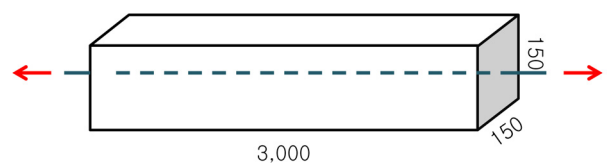


Fig. 2 Dimension of the specimen

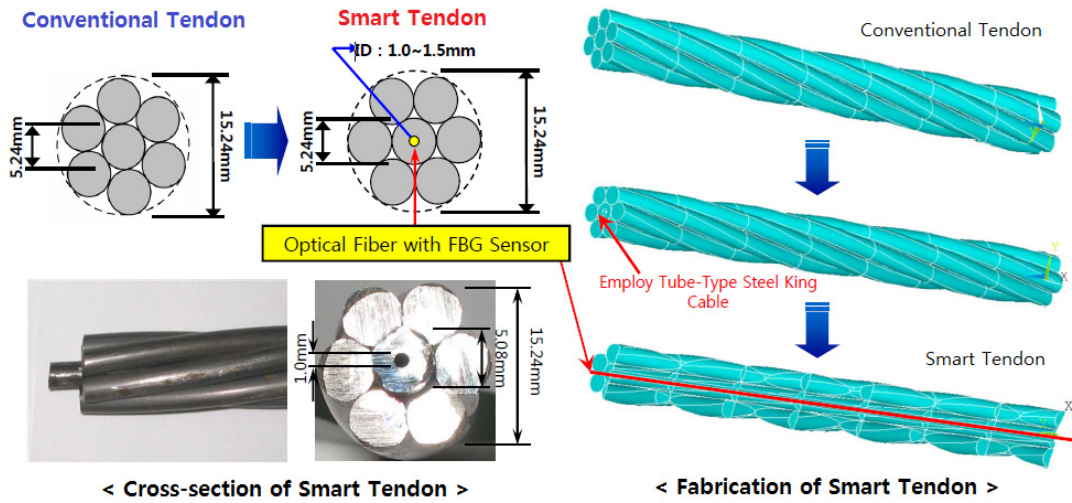


Fig. 3 Seven-wire strand with FBG sensors

강연선 1가닥을 배치하였다.

기존 설계기준 및 문헌들에서 고강도 콘크리트 부재에서의 전달길이가 크게 다르게 예측되는 것으로 나타났으므로, 본 연구에서는 28일 공칭강도가 60MPa인 고강도 콘크리트를 사용하였다. 실제 프리텐션은 콘크리트 재령 12일에 도입하였으며, 이 때 $\phi 150 \times 300$ mm 원형 공시체 3개에 대한 압축강도 실험으로부터 콘크리트의 압축강도는 58MPa로 측정되었다.

한편, 본 연구에서 사용된 FBG 센서가 기입된 스마트 강연선은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 일반 강연선과 달리 강연선 가운데 킹 와이어 내부에 FBG 센서가 기입된 광섬유를 넣은 것으로서, 제작의 용이함 및 FBG 센서 성능 확보 등을 위해 킹 와이어 재질이 일반 강선과 다른 seamless steel tube로 되어있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 Seamless steel tube의 경우 항복 강도가 일반 강선의 약 1,700MPa보다 낮은 약 400MPa인 것으로 측정되었으며, 이에 따라 스마트 강연선의 탄성계수는 일반 강연선보다 작게 된다. 본

연구에서 사용된 스마트 강연선의 경우 프리텐션 실험 시 측정된 하중과 변형률을 바탕으로 산정한 결과 탄성계수가 138,160MPa으로 나타났다.

시험체 제작을 위해 우선 강재로 이루어진 반력대를 조립 및 설치하였으며, 반력대 사이에 시험체 거푸집을 제작하였다. 거푸집 제작 후 강연선을 거푸집에 종방향으로 관통하도록 배치한 뒤 강연선을 긴장 및 반력대에 정착하였다. 강연선 긴장 시 강연선에 도입된 긴장력을 측정하기 위해 반력대 정착구에 로드셀을 설치하였으며, 시험체 중 하나인 S2 시험체에 대해 로드셀을 이용해 측정된 강연선의 긴장력은 108.4kN으로 나타났다. 이는 변형률 0.005657에 해당하는 것으로서 1.925MPa의 인장강도를 가지는 일반 강연선의 인장강도 65%에 해당하는 변형률이다. 강연선 긴장 후 콘크리트를 타설하였으며, 충분한 강도 발현을 위해 12일 동안 야외에서 일반 양생하였으며 긴장된 강연선을 절단함으로써 프리텐션을 콘크리트 시험체에 도입하였다.

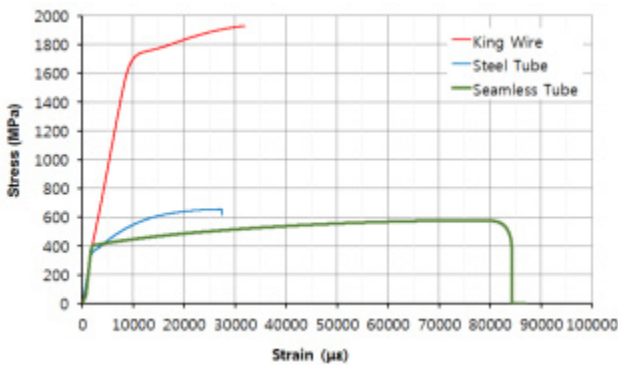


Fig. 4 Stress-strain curves for a king wire, steel tube, and seamless tube



Fig. 5 Steel test frame and the specimens(S1~S4)

Fig. 5는 프리텐션 도입 전 반력대 및 시험체의 배치 모습을 보여주는 것이다.

3.2 계측 센서

프리텐션 도입 시 콘크리트와 강연선의 부착으로 인한 전달길이 구간에서의 강연선 및 콘크리트의 변형률의 변화를 측정하기 위해 부재 단부로부터 거리를 달리하여 총 8개 지점에 대해 FBG 센서를 기입하였다. 이 때, 기존 모델들에 의해 전달길이 구간으로 예상되는 지점에 보다 많은 FBG 센서를 기입하였다. 또한, 강연선에 긴장을 도입할 때와 강연선 절단을 통한 콘크리트 부재로의 프리텐션 도입 이후의 강연선 변형률을 측정하기 위해 시험체 바깥에 노출된 강연선 부위에 대해 FBG 센서 1개를 추가로 기입하였다.

이와 더불어 강연선의 변형률과 콘크리트 변형률을 비교하기 위해 FBG 센서가 기입된 8개 지점에 콘크리트 게이지를 시험체 표면에 부착하였다. 이 때, 시험 중 프리텐션 도입 시 발생 가능한 프리스트레스 편심의 영향을 보정하기 위해 1개 지점마다 시험체 단면의 좌우 및 상면 중앙에 각 1개의 콘크리트 게이지를 부착하였다.

또한, 제한된 계측 센서를 효율적으로 사용하기 위해 프리

텐션 도입 시 강연선 절단에 따른 동적 영향이 상대적으로 작을 것으로 예상되는 부분, 즉 강연선 절단이 이루어지는 반대편에 FBG 센서 및 콘크리트 게이지를 배치하였다. Fig. 6은 시험체에 배치된 FBG 센서와 콘크리트 게이지의 위치를 나타낸 것이다.

3.3 실험 결과

3.3.1 FBG 센서 측정 결과

프리텐션 도입으로 인해 콘크리트 및 강연선에 발생하는 변형률을 각각 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내었다. 여기에서, Fig. 7에서의 콘크리트의 변형률은 콘크리트 표면 게이지로부터 측정된 결과이며, Fig. 8에 나타낸 변형률은 FBG 센서로부터 측정된 것으로서 프리텐션 도입으로 인해 강연선의 변형률에서의 변화값을 나타낸 것이다. 즉, 프리텐션 도입 이후 강연선의 실제 변형률은 Fig. 8에서의 시험체 끝단부의 변형률에 FBG 센서로부터 측정된 변형률을 제거하면 된다. 참고로 총 5개의 시험체 중 4개의 시험체에서 콘크리트 양생 기간 중 FBG 센서 일부가 손실되었으며, 따라서 본 연구에서는 1개의 시험체(S2)에 대해 FBG 센서 계측 결과를 정리하였다.

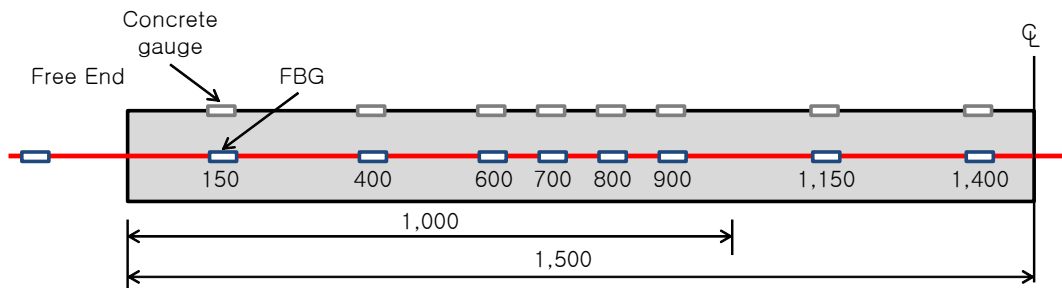


Fig. 6 Locations of FBG sensors and concrete strain gauges

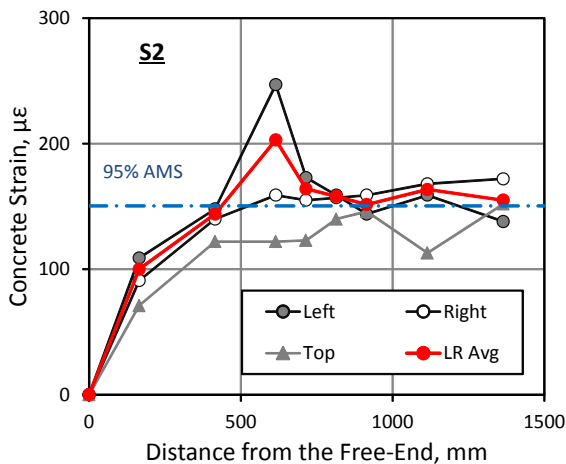


Fig. 7 Concrete strain profile - S2 specimen

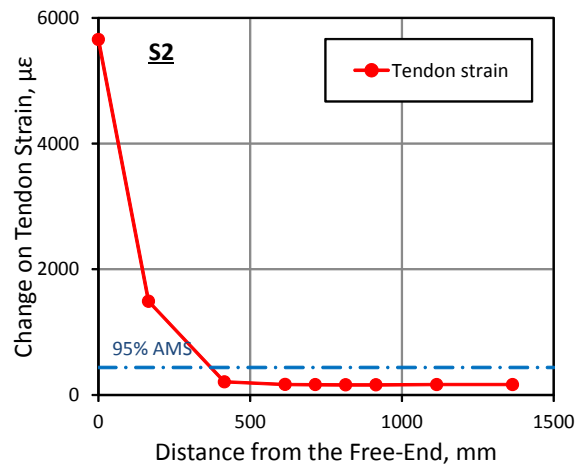


Fig. 8 Tendon strain profile - S2 specimen

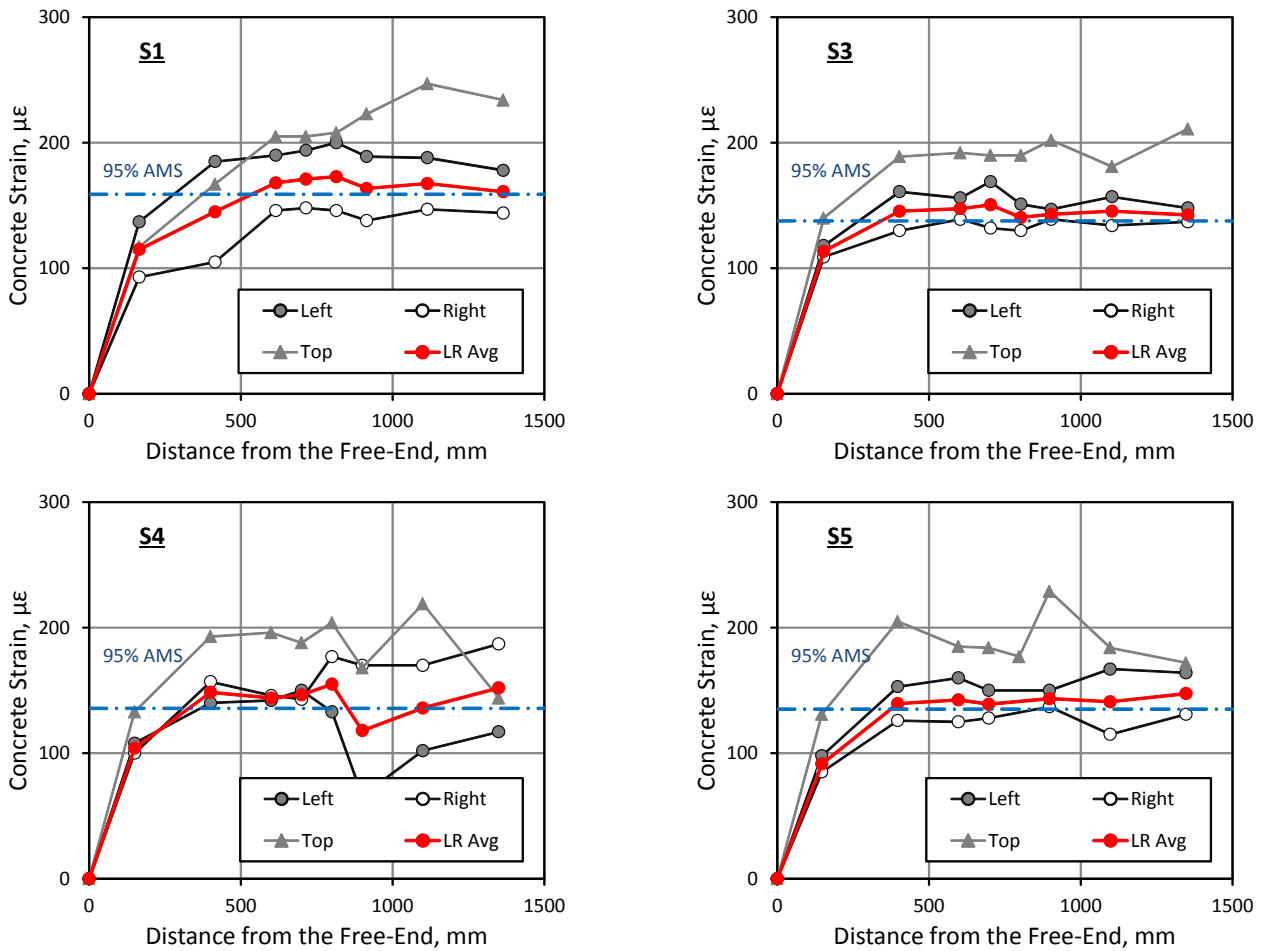


Fig. 9 Concrete strain profiles - S1, S3, S4, S5 specimens

그림에서 나타난 바와 같이 시험체의 끝단부에서는 콘크리트 및 강연선의 변형률이 0이 되지만, 전달길이 구간 내에서 단부로부터 시험체 종방향 안쪽으로 멀어질수록 콘크리트 및 강연선의 변형률이 점차적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며, 전달길이 구간 이후 강연선의 변형률과 콘크리트의 변형률이 서로 거의 동일하게 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 전달길이 구간 내에서 강연선과 콘크리트의 부착으로 인해 프리텐션에 의한 압축력이 점차적으로 도입되는 것을 의미한다.

실험에서 측정된 콘크리트 및 강연선의 변형률을 바탕으로 본 논문에서는 95% AMS(average maximum strain: Russell and Burns, 1993) 방법을 사용하여 전달길이를 산정하였다. 즉, 콘크리트 및 강연선의 변형률이 거의 일정한 시험체 내부 5개 지점에 대한 변형률을 평균함으로써 전달길이 이후의 평균 변형률을 구하였으며, 측정된 변형률이 변화하는 구간에서의 측정결과들을 선형 보간 함으로써 평균 변형률의 95%와 동일한 변형률을 나타내는 지점을 찾아 전달길이를 산정하였다. 참고로 단부로부터 600mm 떨어진 지점에서의 콘크리트 게이지 측정 결과는 실험 측정 오차 등으로

인해 일반적인 경향에서 크게 벗어난 것으로 판단되어 전달길이 산정에서 제외하였다. 그림에서 보는 바와 같이 콘크리트 및 강연선의 변형률로부터 전달길이를 산정한 결과 각각 512mm와 565mm로서 비슷하게 나타났다. 다만, FBG 센서 측정 결과와 달리 전달길이 구간 밖에서 콘크리트 게이지 측정 결과에 편차가 발생하였으며 이에 따라 전달 길이 산정에 실험 측정 오차가 있는 것으로 판단된다. 따라서 FBG 센서를 활용할 경우 실험 결과로부터 보다 정밀한 전달길이 산정이 가능한 것으로 판단된다.

한편, FBG 센서를 활용할 경우 콘크리트 표면 게이지로부터 측정된 결과보다 훨씬 안정적인 결과를 확보할 수 있었으며, 측정의 편이성 및 일반적인 건설현장 관리 상황 등을 고려할 때 FBG 센서의 현장 적용성이 콘크리트 표면 게이지보다 더욱 뛰어난 것으로 판단된다.

3.3.2 콘크리트 표면 게이지 측정 결과

프리텐션된 고강도 콘크리트에서의 강연선 전달길이를 산정하기 위해 S2 시험체를 제외한 나머지 4개의 시험체에서

콘크리트 표면 게이지로부터 측정된 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 참고로 S2 시험체를 제외한 나머지 시험체들의 경우 콘크리트 양생 기간 동안 FBG 센서가 손실되었으며, 콘크리트 게이지 측정 결과만을 전달길이 산정에 활용하였다.

그림에서 보는 바와 같이 콘크리트 표면에 부착된 게이지로부터 측정된 콘크리트의 변형률 분포는 S2 부재와 전반적으로 비슷한 양상을 보였다. 즉, 전달길이가 추정되는 구간 내에서는 콘크리트의 변형률이 시험체 끝단부에서 거리가 멀어질수록 점점 증가하는 것으로 나타났다. S2 시험체와 마찬가지로 95% AMS 방법을 사용하여 전달길이를 산정한 결과 S1, S3, S4, S5 시험체에 대해 각각 536, 343, 328, 374mm로 나타났다. S1 및 S2 시험체에서 상대적으로 다른 시험체에 비해 전달길이가 크게 산정된 것은 S1 및 S2 시험체가 다른 시험체들보다 큰 프리스트레스가 가해진 것이 주요 원인으로 판단되며, 이는 전달길이 구간 밖에서의 콘크리트 평균 변형률이 S1 및 S2 시험체에서 다른 시험체들보다 크게 측정된 것으로 확인할 수 있다.

한편, 콘크리트 표면에 부착된 게이지로부터 측정된 결과는 프리텐션 부재에서의 전형적인 변형률 분포를 전반적으로 보여주고 있으나, 측정된 변형률들이 FBG에 비해 상대적으로 안정적이지 못한 것으로 나타났다. 전달길이 구간 밖인 유효 프리스트레스가 도입되는 구간에서의 각 측정 위치별 변형률을 비교했을 때 S2 시험체에서의 FBG 센서 측정 결과가 최대 6×10^{-6} 의 차이를 나타낸 반면 시험체 좌우면에 부착된 콘크리트 게이지로부터 측정된 변형률은 S4 시험체에서 최대 37×10^{-6} 의 차이가 나타났다. 따라서, 기존의 콘크리트 표면에 부착하는 전기 저항식 게이지보다 FBG 센서가 보다 높은 측정의 정밀성 및 신뢰성을 보여주는 것으로 판단된다.

4. 실험 결과와 기존 모델들과의 비교

본 연구에서 수행된 실험으로부터 측정된 전달길이와 Table 1에 정리되어 있는 기존 모델들이 예측하는 전달길이를 비교한 것을 Fig. 10에 나타내었다. 참고로 본 비교에서는 여러 시험체들의 결과값을 활용하기 위해 콘크리트 표면에 부착된 게이지로부터 산정된 전달길이들을 기존 모델들의 예측값과 비교에 사용하였다. 또한, 기존 모델들을 이용한 전달길이 계산 시 각 시험체별로 실제 도입된 긴장력과 FBG 센서가 기입된 스마트 강연선의 탄성계수를 고려하였다.

그림에서 보는 바와 같이 Zia와 Mostafa(1977) 및 Mitchell 등(1993)이 제안한 전달길이 예측식은 실험에서 측정된 전달길이보다 작게 예측하는 것으로 나타난 반면 ACI 319-11(2011) 및 Balázs(1992)가 제안한 전달길이

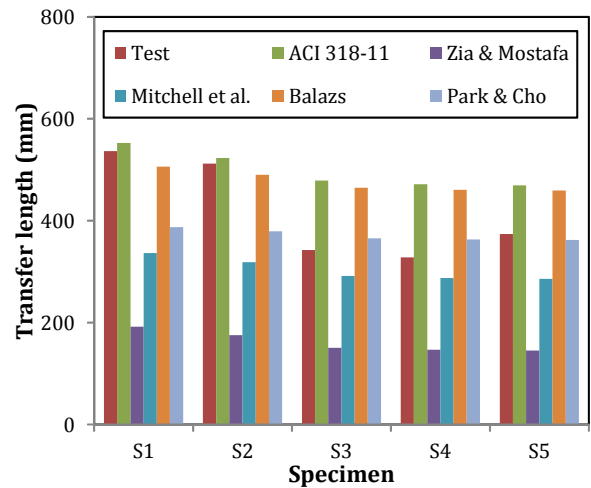


Fig. 10 Comparison of the measured transfer length with the model predictions

예측식은 전달길이가 비교적 크게 측정된 S1과 S2 시험체에 대해 실험 결과와 비슷하게 전달길이를 예측하였으나 전달길이가 비교적 작게 측정된 나머지 시험체에 대해서는 전달길이를 측정값보다 크게 예측하는 것으로 나타났다. 또한, Park과 Cho(2014)의 경우 S1 및 S2 시험체에 대해서는 전달길이를 작게 예측한 반면 나머지 시험체에 대해서는 실험값과 비슷하게 전달길이를 예측하는 것으로 나타났다. 이와 같이 고강도 콘크리트 부재에서의 강연선 전달길이를 예상하는데 있어 기존 모델들이 시험체에 따라 예측 정확성이 많이 달라지는 것은 Park과 Cho(2014)의 실험결과 분석에서 나타났듯이 실제 시험체 별로 강연선의 부착 성능이 크게 달라질 수 있기 때문인 것으로 사료된다. 본 연구에서의 실험 결과, 강연선의 부착 성능이 S1 및 S2 시험체와 나머지 시험체들 등 크게 두 그룹으로 분류되는 것으로 나타났다. Park과 Cho(2014)의 전달길이 분석에서 부착성능 손실이 발생되지 않은 시험체들만을 대상으로 전달길이 모델 유도 및 검증이 이루어진 것을 토대로, 부착성능 손실이 발생되지 않은 시험체 S3~S4에서 측정된 전달길이가 ACI 318-11(2011)의 예측값보다 훨씬 작은 것으로 볼 때, 콘크리트 강도가 증가할수록 강연선 전달길이가 감소하는 것으로 판단할 수 있다. 다만, 강연선의 부착 성능이 시험체별로 편차가 큰 것으로 나타났으므로 일반적인 강연선의 부착 성능을 확인하기 위해 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 고강도 콘크리트 부재에서의 강연선 전달길이를 측정하기 위해 FBG 센서가 기입된 스마트 강연선을 사용하여 총 5개의 시험체를 제작한 후 프리텐션 도입에 따

른 강연선의 전달길이를 측정하였다. 본 연구결과 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) FBG 센서를 통해 계측된 강연선의 전달길이는 콘크리트 표면에 부착된 게이지로부터 측정된 전달길이와 경향이 매우 유사한 것으로 확인되었다.
- (2) 유효 프리스트레스가 도입되는 전달길이 이외의 구간에 대해 계측된 변형률을 분석한 결과 FBG 센서 계측 결과가 최대 6×10^{-6} 의 차이를 나타낸 반면 시험체 좌우면에 부착된 콘크리트 게이지로부터 계측된 변형률은 평균값을 적용하더라도 최대 37×10^{-6} 의 차이가 나타났다.
- (3) 실험 결과 프리텐션 부재의 강연선 전달길이 측정 시 기존의 콘크리트 표면에 부착하는 전기 저항식 게이지보다 FBG 센서가 보다 높은 계측의 정밀성 및 신뢰성을 보여주는 것으로 판단된다.
- (4) 계측의 편이성 및 일반적인 건설 현장 관리 상황을 고려할 때 FBG 센서의 현장 적용성이 기존의 콘크리트 표면 게이지보다 더욱 뛰어난 것으로 판단된다.
- (5) 총 5개의 시험체 중 4개의 시험체에서 양생 중 FBG 센서가 손실되었다. 따라서, FBG 센서 내구성 향상을 위한 기술 개발이 필요한 것으로 나타났다.
- (6) 본 연구 내용은 FBG 센서로부터 계측된 결과를 바탕으로 강연선과 콘크리트 계면에서의 부착 특성 분석 및 일반 강연선에서의 전달길이 측정 산정을 위한 알고리즘 개발 등을 통해 관련 분야 연구 등에 유용할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(과제번호#15CTAP-C078424-02)에 의해 수행되었습니다. 아울러 시험체 제작에 도움을 주신 성환이앤씨, 대우건설 및 한국도로공사에 감사드립니다.

References

- ACI Committee 318** (2011) Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- Balázs, G.L.** (1992) Transfer Control of Prestressing Strands, *PCI J.*, 37, pp.60~71.
- Barnes, R.W., Grove, J.W., Burns, N.H.** (2006) Experimental Assessment of Factors Affecting Transfer Length, *ACI Struct. J.*, 100, pp.740~748.
- Kim, J.M., Kim, H.W., Kim, Y.S., Kim, J.W., Yun, C.B.** (2008) A Methodology for Monitoring Prestressed Force of Bridges Using OFS-embedded Stand, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 21(3), pp.287~294.
- Kim, J.M., Kim, H.W., Park, Y.H., Kim, Y.S.** (2010) Tension Monitoring of a Prestressing Strand for Concrete Bridge using In-Tendon FBG Sensors, *Proc. IABMAS-2010*, pp.205~210.
- Kim, J.M., Kim, H.W., Park, Y.H., Yang, I.H., Kim, Y.S.** (2012) FBG Sensors Encapsulated into 7-Wire Steel Strand for Tension Monitoring of a Prestressing Tendon, *Adv. Struct. Eng.*, 15(6), pp.907~918.
- Lau, K.T.** (2003) Fibre-Optic Sensors and Smart Composites for Concrete Applications, *Mag. Concr. Res.*, 55(1), pp.19~34.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs** (2012) *The Revision of Structural Concrete Design Code*, p.342
- Mitchell, D., Cook, W.D., Khan, A.A., Tham, T.** (1993) Influence of High Strength Concrete on Transfer and Development Length of Prestressing Strand, *PCI J.*, 38, pp.52~66.
- Oh, B.H., Kim, E.S.** (2000) Realistic Evaluation of Transfer Lengths in Pretensioned, Prestressed Concrete Members, *ACI Struct. J.*, 97, pp.821~830.
- Park, H., Cho, J.-Y.** (2014) Bond-Slip-Strain Relationship in Transfer Zone of Pretensioned Concrete Elements, *ACI Struct. J.*, 111, pp.503~513.
- Park, H., Din, Z.U., Cho, J.-Y.** (2012) Methodological Aspects in the Measurement of Strand Transfer Length in Pretensioned Concrete, *ACI Struct. J.*, 109, pp.625~634.
- Ren, L., Li, H.N., Sun, L., Li, D.S.** (2005) Development of Tube-Packaged FBG Strain Sensor and Application in the Vibration Experiment of Submarine Pipeline Model. *SPIE Proc.*, pp.98~103.
- Russell, B.W., Burns, N.H.** (1993) Design Guidelines for Transfer, Development and Debonding of Large Diameter Seven Wire Strands in Pretensioned Concrete Girders, FHWA/TX-93+1210-5F, Center for Transportation Research, the University of Texas

at Austin, Austin, TX, USA, 200.

Russell, B.W., Burns, N.H. (1997) Measurement of Transfer Lengths on Pretensioned Concrete Elements, *J. Struct. Eng.*, ASCE, 123, pp.541~549.

Udd, E. (1996) Fiber Optic Smart Structures, *John Wiley and Sons, Inc.*

Zia, P., Mostafa, T. (1977) Development Length of Prestressing Strands, *PCI J.*, 22, pp.54~65.

요 지

본 논문에서는 프리텐션된 고강도 콘크리트 부재에서의 전달길이를 측정하기 위해 FBG 센서가 기입된 스마트 강연선을 활용하여 실험을 수행하였다. 전달길이 측정을 위해 길이 3m, 단면 150×150mm의 고강도 콘크리트 시험체를 총 5개 제작하였으며, 프리텐션 도입 시 콘크리트 압축강도는 58MPa로 측정되었다. 실험 결과 콘크리트 표면에 부착하는 기존의 전기 저항식 게이지보다 FBG 센서로부터 보다 정밀하고 신뢰성있는 강연선의 전달길이를 계측할 수 있는 것으로 나타났다. 계측 결과로부터 산정된 강연선 전달길이를 기존의 여러 모델들과 비교하였으며, 이를 통해 고강도 콘크리트 부재에서의 전달길이 산정에 대한 기존 모델들의 적용성을 분석하였다. 본 연구 내용은 향후 강연선의 부착 특성 분석 등의 관련 분야 연구 등에 유용할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 스마트 강연선, FBG 센서, 프리텐션, 전달길이