

광섬유 변형 센서를 이용한 구조물의 모니터링

Structural Monitoring Using Fiber Optic Deformation Sensors

정원석* 이희업** 김성일*** 김현민****
Chung, Wonseok Lee, Hee up Kim, Sungil Kim, Hyunmin

ABSTRACT

Fiber optic sensors hold a great potential for structural monitoring due to their stability and durability. This paper deals with the applicability of long-gage deformation fiber optic sensors to prestressed concrete structures. Two sets of 3 m long-gage sensors are attached to the prestressed concrete girder with parallel topology. Using the quadratic regression of measured deformations over the length of sensors it is possible to extrapolate the deflection of the girder. The static response based on the developed method is compared with the results using conventional strain gages and LVDTs.

1. 서론

철도 구조물의 계측기술은 구조물의 거동을 이해하고 향후 해석기술과 설계기술을 발전시키는 데 매우 중요한 자료가 된다. 그 중에서도 구조물 처짐의 측정은 사용성과 강성저하를 판명하는데 기초적인 자료로 사용되는 주요인자이다. 그러나 실제 철도교 등의 처짐을 계측하기 위해서는 접근성이 용이하여야 할뿐 아니라 고정지점을 찾아야 하는 어려움이 따른다. 본 연구에서는 최근 활발히 적용되고 있는 광섬유 변형 센서를 이용하여 비선형 거동을 보이는 콘크리트 구조물의 처짐을 유추하는 방법을 제시하고자 한다. 이는 현재 한국철도기술연구원에서 진행 중인 “스마트 철도 구조물 연구” 과제^[1]의 스마트 계측센서 연구의 일환으로 수행되었다.

광섬유센서는 구조물의 장기계측을 위해 필수적인 내구성과 전자기파에 대한 면역성으로 말미암아 기존의 전기식 게이지를 대신하는 계측장비로 부각되고 있다. 본 연구에서는 long-gage 광섬유 변형센서를 이용하여 철도교 프리스트레스 거더교량의 처짐과 변형률을 검토하였다. 길이 3 m인 광섬유 센서 2쌍을 프리스트레스 거더 중앙지점과 1/4지점의 상면과 하면에 표면 부착하였다. 계측장비로부터 얻어진 변형으로부터 단면의 곡률을 측정하고, 이로부터 Bernoulli 보 이론과 회귀분석을 통해 구조물의 처짐을 유추하였다. 이러한 거시적(macroscopic)인 처짐 측정법은 균열등의 존재로 인해 변형률 측정이 어려운 콘크리트구조물의 수직 처짐을 모니터링하는데 적용될 수 있다.

* 한국철도기술연구원, 선임연구원, 공학박사

** 한국철도기술연구원, 선임연구원, 공학박사, 정회원

*** 한국철도기술연구원, 선임연구원, 공학박사, 정회원

**** 한국철도기술연구원, 주임연구원, 정회원

2. Long-gage 광섬유 변형센서

본 연구에서 사용된 광섬유센서는 스위스 Smartec사의 SOFO standard long-gage 센서^[2]이다. Long-gage 센서는 길이를 30cm에서 최대 10 m까지 늘릴 수 있어 구조물의 거시계측을 위해서는 유리하다. 센서는 구조물의 변형을 측정하는 능동구간 (active zone)과 측정을 돕는 수동구간(passive zone)으로 나뉜다. 그림 1과 같이 능동구간은 변형측정을 위한 측정화이버 (Measurement fiber)와 기준화이버(reference fiber)가 플라스틱 튜브에 의해 보호된 구조물 가지고 있다. 광대역 광원(Broad Band Source, BBS)에서 방출된 빛이 연계기(Coupler)를 통해 두 개의 빛으로 나누어지고 측정화이버와 기준화이버를 통과하면서 발생한 경로차를 통해 변형량을 측정하는 원리를 가지고 있다.

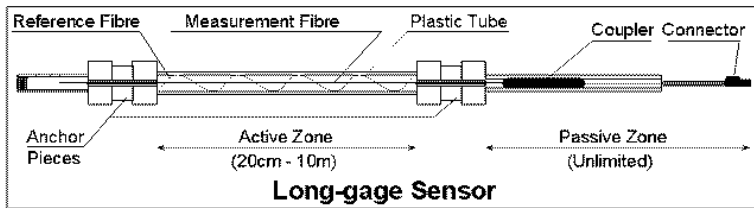


그림 1. SOFO long-gage sensor^[2]

3. 처짐 유추방법

본 연구에서는 광섬유 센서로 구조물의 거시적인 변형(deformation)을 측정하고 “평면은 뒹 변형 후에서도 평면을 이룬다”는 가정에 근거한 Bernoulli 보 이론과 보의 기하학적인 휨을 고려하면 식(1)과 같은 관계를 보인다^[3].

$$\kappa(x) = \frac{1}{\rho(x)} = \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \quad (1)$$

여기서 $\kappa(x)$ 는 임의의 중단면 x 에서의 곡률, $w(x)$ 는 임의의 중단면 x 에서의 수직처짐이다. 중방향(x)의 원점이 지간의 중앙이다. 식 (1)은 보의 기하학적인 변형에 근거하여 유도된 식이므로 재료 물성치와의 상관관계는 존재하지 않는다. 한편, 센서로부터 측정된 변형을 이용하여 식(2)와 같이 평균 곡률을 구할 수 있다.

$$\kappa(x) = \frac{\epsilon_b - \epsilon_t}{h} = \frac{m_b - m_t}{L_s} \frac{1}{h} \quad (2)$$

여기서 ϵ_b 는 하부 센서구간에서의 평균변형률, ϵ_t 는 상부 센서구간에서의 평균변형률, m_b 는 측정된 하부 변형, m_t 는 측정된 상부 변형, L_s 는 센서의 길이, h 는 센서간의 거리이다.

한편, 임의의 지점에서의 단순보 처짐은 2차식의 형태로 표현될 수 있다.

$$\kappa(x) = ax^2 + bx + c \quad (3)$$

식(1)을 적분을 통해 임의의 종방향(x)에서의 처짐식을 구하고 단순보의 경계조건인 $w(x=0) = 0$, $w'(x=L/2) = 0$ 을 적용하면 식(4)와 같은 처짐식이 유도된다.

$$w(x) = \frac{a}{12}x^4 + \frac{b}{6}x^3 + \frac{c}{2}x^2 - \left(\frac{aL^4}{192} + \frac{bL^4}{48} + \frac{cL^4}{8} \right) \quad (4)$$

여기서 L 은 구조물의 전체길이이며, 상수 a , b , c 는 식(3)에서 제시된 계수이다. 이러한 계수의 결정은 지지점에서의 곡률을 이용하여 최소자승법을 통해 구할 수 있다.

본 연구에서 제안된 처짐 유추방법은 구조물의 중립축 위치가 처짐산정을 위한 매개변수가 아니므로, 기존에 제안된 변형률을 측정 후 최소자승법을 적용하여 처짐을 유추하는 방법^[4]에 비해 구조물에 균열이 발생하여도 처짐의 산정이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 비선형 거동을 보이는 콘크리트나 항복이 발생한 철근의 계측 시 유리하다.

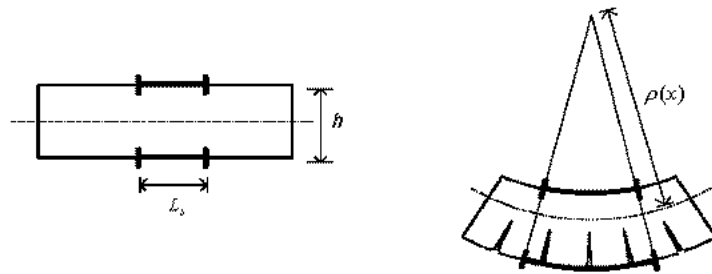


그림 2. 썩에 의한 보의 기하학적 변형

4. 철도교 프리스트레스 거더 실물실험

앞서 제시된 처짐 유추법을 검증하기 위해 한국철도기술연구원에서 수행중인 “IPC (Incrementally Prestressed Concrete) 거더 동적분석에 의한 철도교량 적용성 연구” 과제의 일환으로 현대건설 기술연구소 실험동에서 수행된 실물 실내실험에 long-gage 광섬유 변형센서를 부착하여 재하실험을 수행하였다. 실험체는 25 m 길이의 단순지간으로 실험체의 체원과 단면은 그림 3과 같다. 길이 3m의 광섬유 센서 2쌍을 지간의 중앙부와 1/4지점 상하면에 표면 부착하였다. 센서의 설치를 위해 콘크리트 표면에 L형 브라켓을 설치한 후 광섬유 센서를 부착하였으며, 압축 시에도 변형 측정이 가능하도록 센서에 지정된 크기의 인장력을 미리 가하였다. 실제 부착된 광섬유 센서와 실물실험체의 사진은 그림 4와 같다. 광섬유 센서의 검증을 위해 지간의 중앙부와 1/4지점에 LVDT를 설치하여 처짐을 직접 측정하였으며, 거더 하부의 6개의 주철근의 상하부에 각각 전기식 변형률 게이지를 설치하였다. 또한 광섬유 센서와 동일한 위치의 콘크리트 표면에 전기식 변형률 게이지를 부착하였다. 작용하중은 중앙지점에서 각각 3.5m 떨어진 지점에 집중하중을 가하여 중앙 7m 구간에 순수 썩이 작용하도록 하였다.

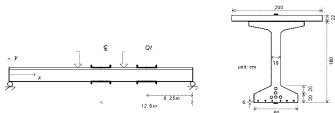


그림 3. 철도교 RC 거더 제원 및 센서부착 위치

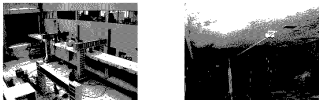


그림 4. 실험실형태와 개축센서설치 전경

5. 실험결과

표면 부착된 장섬유 센서로부터 측정된 변형은 그림 5와 같다. 구조물의 상부 압축측에서는 최종 재하하중인 1,100 kN까지 선형거동을 보이는 반면, 하부 인장측에서는 내부 콘크리트의 미세 균열 발생으로 인한 약간의 비선형거동을 보이다가 약 900 kN 정도부터 순수 휨 구간 (중앙하부)에 설치된 센서에서 심한 비선형 거동이 감지되는 것을 알 수 있다.

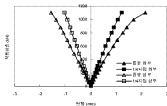


그림 5. 장섬유 센서의 변형 측정치

식(2)에서 제시된 바와 같이 측정된 변형을 센서길이(L_s)로 나누면 측정 구간에서의 평균변형률을 구할 수 있으며 이를 그림 6에서 그림 9까지 도시하였다. 실험에서는 광섬유 센서와의 직접비교를 위해 콘크리트 표면에 변형을 게이지를 설치하였으며, 그림 3의 거더 단면과 같이 하부 6개의 주철근에 각각 2개씩의 변형률 게이지를 설치하여 거더의 내부 변형상태를 측정하였다.

그림 6은 순수 휨 구간인 중앙하부에서의 변형률을 비교한 것이다. 총 12개의 매립 게이지 중 8개의 게이지에서 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 철근에 부착된 게이지 중 4개가 콘크리트 타설등으로 인해 손실되었음을 추정할 수 있다. 한편, 광섬유 센서로 측정한 변형률은 생존한 매립게이지와의 결과가 비슷한 것을 알 수 있다. 그러나 표면 부착된 게이지는 약 650 kN 정도의 하중부터 상이한 결과를 보였다. 그림 7은 지간 1/4지점에서의 변형률 결과를 비교한 것으로 광섬유 센서를 통한 변형률이 매립 게이지를 통한 변형률과 비슷한 결과를 보임을 알 수 있다. 지간 중앙부와 1/4지점에서 변형률을 비교한 도표는 각각 그림 8과 그림 9와 같다. 중앙상부의 표면부착된 변형률 게이지는 왜곡된 결과를 보인 반면 1/4지점의 표면게이지는 광섬유센서를 이용한 변형률과 비슷한 결과를 보였다.

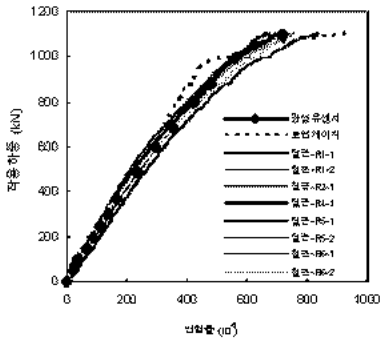


그림 6. 중앙 하부에서의 변형률

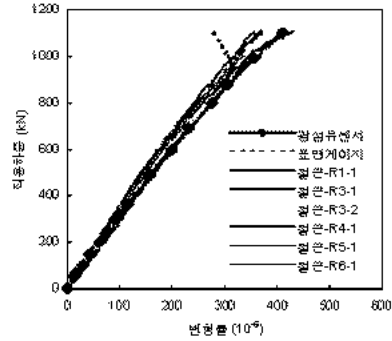


그림 7. 1/4지점 하부에서의 변형률

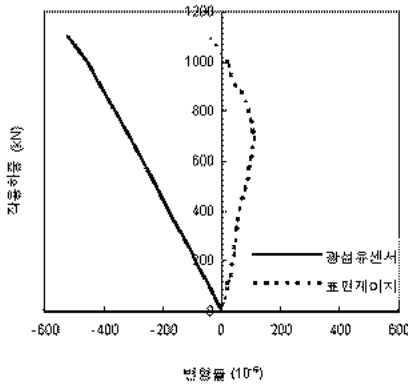


그림 8. 중앙 상부에서의 변형률

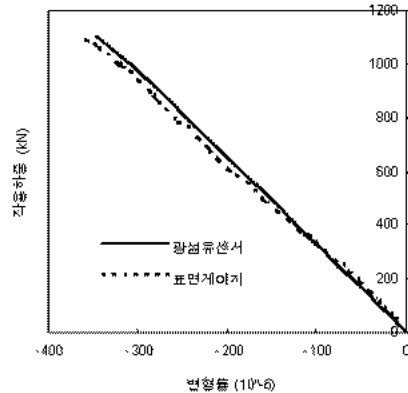


그림 9. 1/4지점 상부에서의 변형률

그림 10은 3절에서 제시된 치짐 유추방법으로 산정한 거더의 수직치짐을 직접 치짐측정 장비인 LVDT를 이용하여 얻은 결과와 비교한 것이다. 실험에서는 작용하중 900 kN정도부터 거더의 순수 휨 구간의 하부에 육안으로 관찰 가능한 균열이 발견되었으며, 최종 재하하중인 1,100 kN에 이르기까지 균열이 계속 진전되었다. 이는 그림 10의 중앙부 치짐곡선과 같이 초기에는 선형에 가까운 비선형 거동을 보이다가 작용하중 900 kN정도부터 뚜렷한 비선형 거동이 발생하는 것으로 균열의 발생과 진전

의 확인이 가능하다. 그림에서와 같이 광섬유 센서를 이용한 처짐은 직접 측정한 처짐과 매우 흡사하며 최대오차는 약 6%이다.

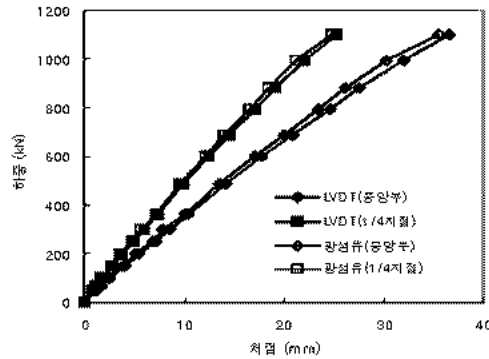


그림 10. 처짐 비교

6. 결론

본 연구에서는 long-gage 광섬유 변형센서를 이용하여 구조물의 수직처짐을 유추하는 방법을 제시하였다. 방법의 검증을 위해 철도교 프리스트레스 거더의 실험 재하실험에 광섬유센서를 설치하였다. 광섬유 격자센서를 이용한 변형률을 기존의 전기저항식 변형률 게이지와 비교하여 본 결과 매우 비슷한 결과를 보임을 알 수 있었다. 또한 구조물의 상하면에 설치된 광섬유 센서를 이용한 곡률 추정방법으로 처짐을 계산한 결과 직접 측정한 처짐값과 6% 이내의 오차를 보였다. 따라서 처짐계의 설치가 용의하지 않거나 전자기파의 간섭이 심한 교량의 처짐계측에 사용가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원 (2004), "스마트철도구조물기술연구"
2. Inaudi, D. (1999), "SOFO System User's Manual, Version 6", SMARTEC SA, Switzerland.
3. Gere, J.M., Timoshenko, S.P.(1984), "Mechanics of Materials", Chapman & Hall, New York.
4. 김남식, 조남소 (2002), "광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 교량의 수직처짐 연구", 대한토목학회논문집, 22권, 6-A호, pp. 1357-1366.