

Long-gauge 광섬유 센서를 이용한 철도교 PSC 거더의 처짐유추

Deflection Estimation of a PSC Railroad Girder using Long-gauge Fiber Optic Sensors

정원석[†] · 김성일* · 김남식** · 이희업*

Wonseok Chung · Sungil Kim · Nam-Sik Kim · Hee-Up Lee

Abstract

This paper deals with the applicability of long-gauge deformation fiber optic sensors (FOS) to prestressed concrete structures. A main motivation is the desire to monitor the deflection of the railway bridges without intervenes of the signal intensity fluctuations. A 25 m long, 1.8 m deep PSC girder was fabricated compositely with 22 cm thick reinforced concrete deck. Two pairs of 3 m long-gauge sensors are attached to the prestressed concrete girder with parallel topology. Using the relationship between curvature and vertical deflection and the quadratic regression of curvatures at the discrete point, it is possible to extrapolate the deflection curve of the girder. The estimated deflection based on the developed method is compared with the results using conventional strain gauges and LVDTs. It has been demonstrated that the proposed instrumentation technique is capable of estimating the vertical deflection and neutral axis position of the prestressed concrete girder up to weak nonlinear region.

Keywords : Fiber optic sensor, Concrete, Monitoring, Curvature, Deflection

1. 서론

토목구조물의 안전유지를 위해서는 적절한 진단기술에 바탕을 둔 구조시스템의 잔존수명 예측과 적절한 보수보강이 필요하다. 이러한 구조물의 안전유지를 위해 최근에는 구조물이 외부 환경변화를 스스로 감지하고 적절히 대응할 수 있는 스마트 혹은 지능형 구조물의 개발이 수행되어지고 있다. 이 중에서 인체의 신경계와 같이 외부 환경 변화 및 구조물 자체의 거동과 손상 여부를 감지하는 스마트 센서의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 광섬유 센서를 적용하는 연구가 많이 진행되고 있다.

광섬유 센서는 구조물의 장기계측을 위해 필수적인 내구성, 온도변화와 전자기파에 대한 면역성을 장점으로 기존의 전기식 게이지를 대신하는 계측장비로 부각되고 있다. 실제로 철도교량의 경우 전철화 구간에서는 강한 전자기파의 간섭

으로 인해 전기저항식 센서를 이용한 계측에 어려움을 겪고 있으며, 앞으로 추진될 자기부상열차 구조물의 경우에는 자기파의 영향이 매우 클 것으로 예상된다. 이렇듯 국내외에서 기존의 전기저항식 센서를 대체할 수 있는 광섬유 센서를 이용한 구조물의 모니터링 기술의 필요성과 중요성이 대두되고 있다.

최근에는 격자형 광섬유 센서(Grating Sensor)인 FBG(Fiber Bragg Grating) 센서를 토목 구조물에 적용한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 국내에서도 격자형 광섬유 센서를 이용하여 철근콘크리트 보의 정적응답을 기존의 전기식 센서와 비교하는 연구[1]로부터 실제 교량의 적용[2]에 이루어지기까지 활발한 연구가 이루어졌다.

격자형 이외에도 간섭형 광섬유 센서(Interferometric Sensor)인 페브리-페롯 광섬유 센서를 콘크리트 보에 적용하여 기존센서와 비교한 연구도 수행되었다[3].

북미에서는 캐나다의 ISIS(Intelligent Sensing for Innovative Structures)를 중심으로 FRP 소재를 이용한 콘크리트 구조물의 보수보강에 광섬유 센서를 이용, 구조물의 성능을 모니터링하는 연구가 활발히 수행되고 있다[4]. 또한 콘크리트

† 책임저자: 정원석, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부
E-mail: wschung@krii.re.kr
TEL: (031)460-5353 FAX: (031)460-5359

* 정희원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부, 선임연구원

** 부산대학교 토목공학과, 조교수

구조물의 적용성 및 타당성에 관한 연구[5,6]가 수행되었다.

본 연구에서는 구조물의 사용성과 강성저하를 판명하는데 기초적인 자료로 사용되는 주요인자인 구조물의 처짐을 광섬유 센서를 이용하여 추정하고자 한다. 특히 휨 부재의 처짐과 곡률의 기하학적인 관계를 고려하여 비선형 거동을 보이는 콘크리트 구조물의 처짐을 유추하는 방법을 제시한다. 본 연구의 처짐 유추법은 광섬유 센서를 구조물에 부착하여 처짐을 산정하므로 실제 교량구조물의 처짐 측정 시형하공간에 고정지점을 설치하여야 하는 접근성 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

구조물의 처짐유추를 위해 간섭형 광섬유 센서인 long-gauge 광섬유 센서(Long-gauge Fiber Optic Sensor, LGFOS)를 사용하였다. long-gauge 센서는 길이를 최대 10m 까지 늘릴 수 있으며 플라스틱 튜브에 광섬유를 삽입한 형태로 상품화된 센서이다. 본 연구에서 제시한 처짐 유추방법의 검증에 위해 long-gauge 센서를 철도교IPC(Incrementally Prestressed Concrete) 거더에 설치하여 처짐과 변형률을 검토하였다. 길이 3m인 광섬유 센서를 각각 IPC 거더 중앙지점과 1/4지점의 상면과 하면에 표면 부착하여 단면의 곡률을 측정하고, 이로부터 회귀분석과 Bernoulli 보 이론을 이용하여 처짐을 유추하였다. 이러한 거시적인 처짐 측정법[7]은 균열 등의 존재로 인해 변형률 측정이 어려운 콘크리트 구조물의 수직 처짐을 모니터링하는데 적용될 수 있다.

2. Long-gauge 광섬유 센서

광섬유 센서는 빛의 광학적 특성에 따라 광강도형(Light Intensity Sensor), 편광형(Polarimetric Sensor), 산란형(Scattering Sensor), 간섭형(Interferometric Sensor), 격자형(Grating Sensor) 등으로 나뉜다. 광강도형과 편광형은 비교적 구성이 간단하여 광섬유 센서 연구 초기에 많이 사용되었으나 센서의 특성이 좋지 않고 물리량을 정량적으로 측정하기 어려우므로 현재는 널리 사용되지 않고 있다. 산란형 센서는 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)등과 같이 광섬유 내부를 통과하는 빛의 역산란을 이용하는 분포형 센서(Distributed Sensor)로서 구조물 전체구간을 감지할 수 있는 장점이 있으나 해상도가 낮아 대형구조물의 대략적인 측정에 사용되고 있다. 현재는 민감도와 동적특성이 뛰어난 간섭형 센서와 다중화(Multiplexing)등이 용이한 격자형 센서가 많이 사용되고 있다.

본 연구에 사용된 long-gauge 광섬유센서는 스위스 Smartec사의 SOFO long-gauge 센서이다[8]. 이 센서는 간섭형 광섬유 센서로 low-coherence interferometry의 원리를 기초로 개발되었으며, 센서의 길이를 30cm에서 최대 10m까지 늘

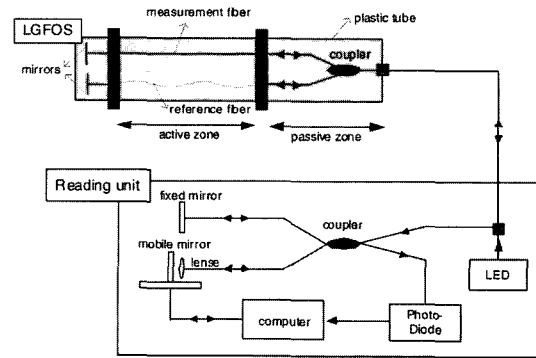


그림 1. SOFO long-gauge 광섬유 센서의 원리

릴 수 있어 구조물의 거시계측을 통한 모니터링에 유리하다. SOFO long-gauge 센서부는 그림 1과 같이 구조물의 변형을 측정하는 능동구간(Active Zone)과 측정을 돕는 수동구간(Passive Zone)으로 나뉜다. 플라스틱 튜브로 보호된 센서부는 팽팽하게 긴장되어 구조물과 일체로 거동하는 측정화이버(Measurement Fiber)와 변형이 발생하지 않도록 느슨하게 풀어놓은 기준화이버(Reference Fiber)로 구성되어 있다. 발광 다이오드(LED)에서 방사된 빛이 연계기(Coupler)를 통해 두 개의 빛으로 나누어져 측정화이버와 기준화이버를 통과하게 되고, 끝단의 거울에서 반사된 빛의 경로차를 통해 원하는 물리량을 측정하는 원리를 가지고 있다.

3. 처짐 유추법

구조물의 수직처짐은 보의 기하학적인 휨을 고려하여 식 (1)과 같이 곡률과의 관계로 표현될 수 있다. 이는 “평면은 휨 변형 후에서도 평면을 이룬다”는 Bernoulli 가정에근거한 식이다.

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

여기서 $\kappa(x)$ 는 임의 종단면의 곡률, $w(x)$ 는 임의 종단면에서의 수직처짐, ρ 는 곡률반경이다. 종방향(x)의 원점은 시간의 중앙이다. 식 (1)은 기하학적인 변형에 근거하여 유도되었으므로 재료성질과의 상관관계는 존재하지 않는다.

그림 2와 같이 long-gauge 센서가 중립축에 평행하게 구조물의 상하면에 설치되어 있다면 평균 곡률은 식 (2)와 같이 결정된다.

$$\kappa_m = \frac{\varepsilon_b^m - \varepsilon_t^m}{h} = \frac{m_b - m_t}{L_s h} \quad (2)$$

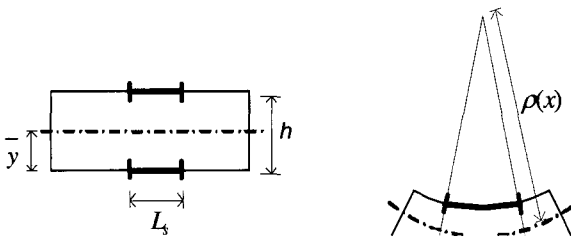


그림 2. 기하학적인 곡률분포

여기서 m_b 은 측정된 하부 변형, m_t 은 측정된 상부 변형, ε_b^m 은 하부 센서구간에서의 평균변형률, ε_t^m 은 상부 센서구간에서의 평균변형률, L_s 는 센서의 길이, h 는 센서간의 거리이다. 이와 같이 센서가 표면 부착된 경우의 구조물의 중립축(\bar{y})은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{y} = \frac{m_b}{m_t + m_b} h \quad (3)$$

기존에 제안된 처짐유추 실험 방법[9]은 강재 보의 하부 변형률을 측정하고 이로부터 선형회귀분석을 통해 보의 처짐을 유추하였다. 이 방법은 구조물이 선형 거동을 보일 때는 실험치와 일치하는 우수한 결과를 보였지만 구조물의 중립축을 미리 결정하여야 가능하다는 단점을 가지고 있다. 콘크리트와 같이 비교적 낮은 하중에서 균열의 발생으로 인해 비선형 거동을 보이게 되는 구조물은 중립축의 위치가 변하게 되므로 본 연구에서는 이산 지점에서 직접 곡률을 측정하고 곡률의 회귀분석을 통해 곡률식을 유추하여 처짐을 결정하는 방법[7]을 채택하였다.

임의 지점에서 단순보의 곡률은 식 (4)와 같이 2차식으로 표현할 수 있다.

$$\kappa(x) = ax^2 + bx + c \quad (4)$$

구조물의 처짐은 식 (4)를 길이방향으로 이중적분을 통해 결정될 수 있으며 이는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$w(x) = \iint \kappa(x) dx dx \quad (5)$$

구조물과 하중이 대칭인 단순보의 경우, 경계조건인 $w_{(x=0)} = 0$ 와 $w'_{(x=L/2)} = 0$ 을 고려하면 식 (6)과 같은 처짐식이 유도된다.

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

여기서 L 은 구조물의 전체길이이며, 식 (4)의 곡률상수 $a, b,$

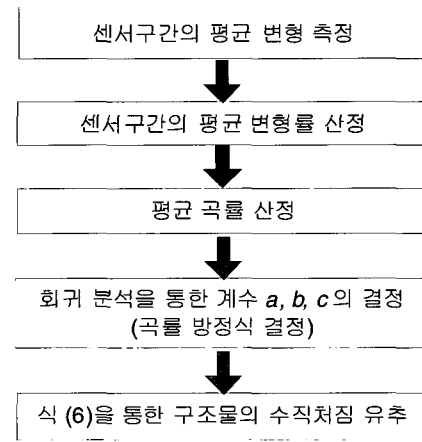


그림 3. 처짐유추 순서도

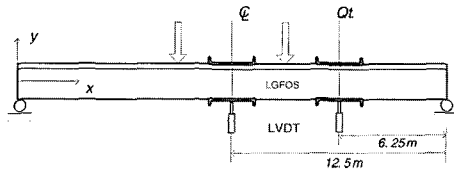
c 는 회귀분석을 통해 결정된다. 처짐 유추를 위한 순서도는 그림 3에 제시되었다. 위에서 제시된 처짐유추법은 단순보의 경우에 유효하며, 연속보의 경우에는 하중의 위치와 지점의 위치에 따라 곡률형상이 변하므로 이를 고려한 곡률을 측정하여야 한다.

4. 철도교 PSC 거더 실물실험

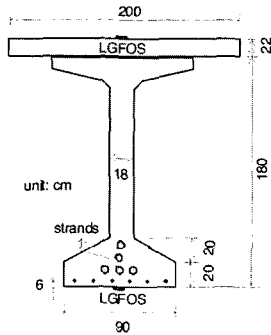
앞서 제시된 처짐 유추법을 검증하기 위해 한국철도기술연구원에서 주관한 “IPC 거더의 동적거동 분석을 위한 실내 실험”의 실물 실험체에 long-gauge 광섬유 변형센서를 부착하여 재하실험을 수행하였다. 실험체는 25m 길이의 단순지간으로 실험체의 계획과 단면은 그림 4와 같다.

그림 5는 재하실험을 위해 하중 프레임을 설치한 후의 IPC 거더 실험체의 사진이다. 작용하중은 중앙지점에서 각각 3.5m 떨어진 지점에 집중하중을 가하여 중앙 7m 구간에 순수 휨이 작용하도록 하였다. 작용하중은 실험실의 안전상의 문제로 사용하중의 약 200% 정도까지 작용하였다.

Long-gauge 광섬유 센서는 길이가 3m이며, 그림 4(a)와 같이 센서의 중앙점이 지간의 중앙부와 1/4지점에 위치하도록 표면 부착하였다. 센서의 설치를 위해 콘크리트 표면에 L형 브라켓을 설치한 후 광섬유 센서를 부착하였으며, 압축시에도 변형 측정이 가능하도록 센서에 지정된 크기의 인장력을 미리 가하였다. 실제 부착된 광섬유 센서와 실물실험체의 사진은 그림 6과 같다. 광섬유 센서의 검증을 위해 지간의 중앙부와 1/4지점에 LVDT(Linear Variable Differential Transformers)를 설치하여 처짐을 직접 측정하였으며, 변형률 계이지는 중앙 지간과 1/4 지간에서 그림 4(b)와 같이 배치된 6개의 주철근의 상하부에 설치하였다. 또한 광섬유 센서와 동일한 위치의 콘크리트 표면에 전기식 변형률 계이지



(a) 정면도



(b) 단면도

그림 4. 검증 실험체

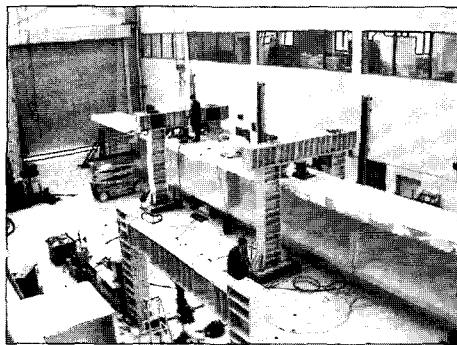


그림 5. 검증 실험 장면

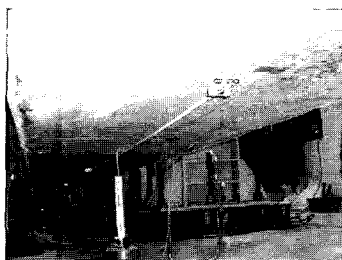


그림 6. 광섬유 센서와 LVDT 설치 모습

를 부착하였다.

5. 실험 결과

표면 부착된 광섬유 센서로부터 측정된 변형은 그림 7과 같다. 구조물의 상부 압축측에 설치된 광섬유 센서에서는 최종 재하하중인 1,100kN까지 거의 선형거동과 보이는 반면,

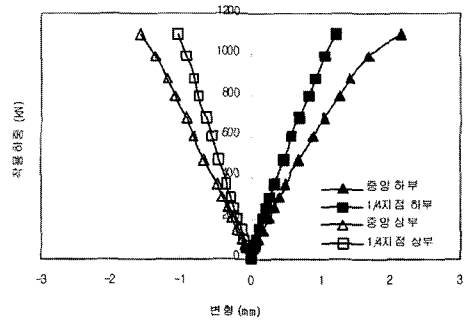
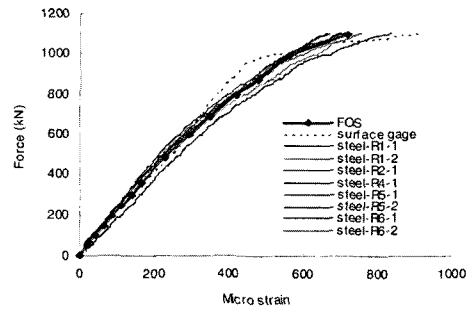
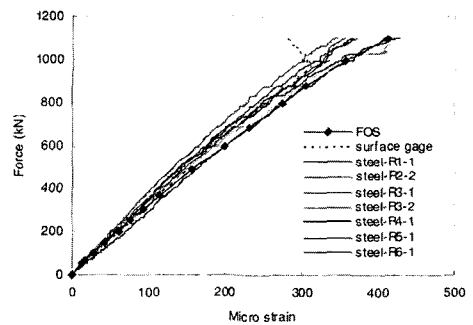


그림 7. 측정된 평균 변형



(a) 1시간 중앙 하부



(b) 1/4시간 하부

그림 8. 변형을 비교

하부 인장측에 설치된 광섬유 센서에서는 내부 콘크리트의 미세균열 발생 등으로 인해 약간의 비선형거동을 보이다가 약 900kN 정도부터 순수 휨 구간(중앙하부)에 설치된 광섬유 센서에서 뚜렷한 비선형 거동이 감지되는 것을 알 수 있다.

측정된 변형을 센서길이로 나누면 측정 구간에서의 평균 변형률을 구할 수 있으며 이를 그림 8에 도시하였다. 앞서 설명한 바와 같이 실험에서는 광섬유 센서와의 직접비교를 위해 콘크리트 표면에 변형률 게이지를 설치하였으며, 또한 그림 4(b)의 거더 단면과 같이 하부 6개의 주철근(R1-R6)에 각각 2개씩(상부:1, 하부:2)의 변형률 게이지를 설치하여 거더의 내부 변형상태를 측정하였다.

그림 8(a)는 순수 휨 구간인 중앙지점 하부에서의 변형률을 비교한 것이다. 총 12개의 매립 게이지 중 8개의 게이지

에서 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 철근에 부착된 게이지 중 4개가 콘크리트 타설 등으로 인해 손실되었다. 한편, 광섬유 센서로 측정된 평균 변형률은 생존한 매립게이지와의 결과가 비슷한 것을 알 수 있다. 그러나 표면 부착된 게이지는 약 650kN 정도의 하중부터 상이한 결과를 보였다.

그림 8(b)는 시간 1/4지점 하부에서의 변형률 결과를 비교한 것으로 광섬유 센서를 통한 변형률이 매설 게이지를 통한 변형률의 측정범위 내에 존재함을 확인할 수 있다. 철근에 부착되어 매설된 전기저항식 센서는 12개 중 5개가 손실되어 약 60% 정도의 생존율을 보였다. 콘크리트 표면에 부착된 전기저항식 센서는 약 900kN 정도에서부터 왜곡된 결과를 보였다. 이는 외부나 콘크리트 표면의 물리적인 변화에 센서가 안정성을 손실하였음을 의미한다. 즉, 광섬유 센서는 우수한 측정 신뢰성과 내구성을 보임을 확인할 수 있다.

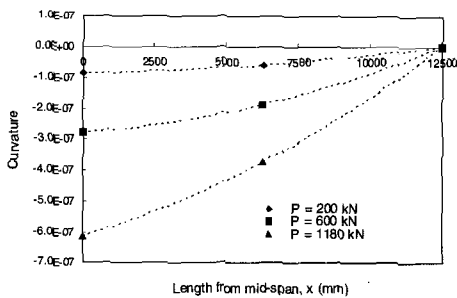
그림 9는 중앙지점과 1/4지점에서 결정된 평균 곡률을 이용하여 각 하중별로 2차 곡선을 이용한 회귀분석을 수행한 결과이다. 본 연구에서 수행된 실험은 구조물과 하중이 대칭으로 정확한 회귀상수 a, b, c를 얻을 수 있으므로 회귀상

관계수 R^2 값은 1이다.

그림 10은 앞서 제시된 처짐 유추방법으로 산정한 거더의 수직처짐과 직접 처짐측정 장비인 LVDT를 이용하여 얻은 결과를 비교한 것이다. 실험에서는 작용하중 900kN 정도부터 거더의 순수 휨구간의 하부에 그림 11(a)와 같이 육안으로 관찰 가능한 균열이 발견되었으며, 최종 재하하중인 1,100kN에 이르기까지 균열이 계속 진전되었다. 이는 그림 10의 중앙부 처짐곡선과 같이 초기에는 선형에 가까운 비선형 거동을 보이다가 작용하중 900kN 정도부터 비교적 뚜렷한 비선형 거동이 발생하는 것으로 균열의 발생과 진전의 확인이 가능하다. 그림에서와 같이 광섬유 센서를 이용하여 산정한 처짐은 LVDT를 이용하여 직접 측정한 값보다 일관적으로 작은 값을 보이고 있으며 최대오차는 약 6%이다. 이는 두 가지 이유에서 기인하는 것으로 판단된다. 첫 번째, 사용된 광섬유 센서는 long-gauge 센서로 센서구간의 평균 값을 제시하고 있다. 본 연구에서는 이러한 평균값을 센서구간의 중앙부의 값으로 고려하였으므로 계속된 물리량을 과소평가 하는 것으로 보인다. 두 번째, 광섬유 센서 설치가 종방향으로 구조물과 평행하지 않으면 실제 변형을 과소평가 하게 되며 이는 처짐의 과소평가로 이루어질 수 있다. 이러한 점을 고려했을 때 광섬유 센서 이용한 처짐값이 직접 측정치보다 약간 작게 나오는 것을 이해할 수 있다. 앞서 서술한 사항은 long-gauge 측정 방법의 단점으로 향후 이를 보정을 하기 위한 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

그림 12는 하중증가에 따른 중립축의 위치변화를 나타낸 그림으로, 중립축의 위치는 식 (3)에서 정의된 단면 하단으로부터의 거리이다. 중립축 위치의 변화가 거의 발생하지 않다가 약 400kN 정도부터 중립축이 상부로 이동함을 알 수 있는데 이는 이때부터 미세 균열이 구조물의 내부에 발생하기 시작하여 진전되고 있음으로 추측된다. 앞서 기술한 바와 같이 육안으로 식별 가능한 균열이 비교적 심하게 발생하는 약 900kN부터 중립축이 심하게 천이되고 있음을 확인할 수 있다.

앞서 설명한 바와 같이 본 연구에서 제시한 이산 지점의 곡률을 이용하여 처짐을 유추하는 방법은 기존의 거더 하부의 변형률을 측정하고 중립축 위치를 계산하여 처짐을 유추하는 방법에 비해 콘크리트 구조물에 대한 적용성이 우수하다. 실제 PSC 거더의 경우에는 프리스트레싱 효과와 콘크리트 균열의 영향을 고려한 중립축의 위치를 정확히 찾아내기가 어렵다. 그러나 본 연구에서는 실험에서 측정된 곡률을 이용하여 직접 중립축의 위치를 찾아내므로 프리스트레싱과 콘크리트 균열의 영향을 모두 고려할 수 있다는 장점이 있으며, 중립축 위치의 모니터링이 콘크리트 구조물의 거시적인 균열 상태를 판단할 수 있는 척도가 됨을 확인할 수 있었다.



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

P (kN)	a (10^{-16})	b (10^{-12})	c (10^{-8})
200	4.1822	1.7426	8.7129
600	12.673	6.4686	27.888
1180	17.595	27.023	61.271

그림 9. 회귀분석을 통한 곡률식의 결정

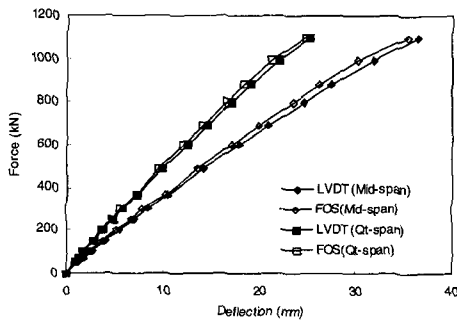


그림 10. 처짐 비교

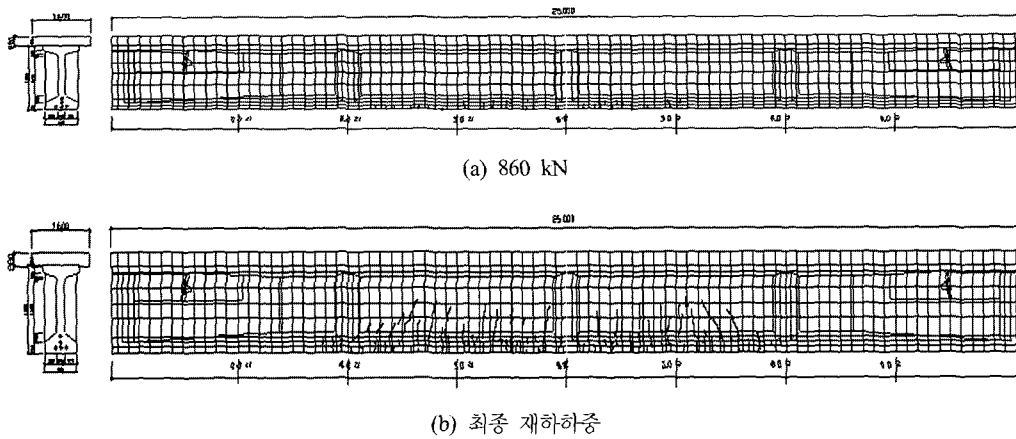


그림 11. 균열분포도

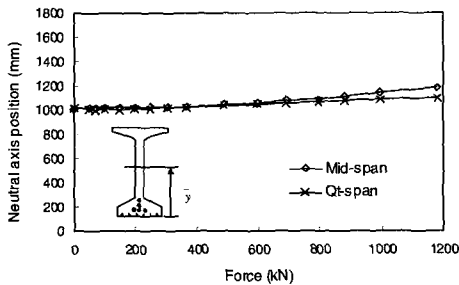


그림 12. 중립축 위치변화

6. 결론

본 연구에서는 long-gauge 광섬유 센서를 이용하여 구조물의 수직처짐을 유추하는 방법을 제시하였다. 제안된 실험 방법은 구조물의 중립축 위치가 처짐 산정을 위한 매개변수가 아니므로 콘크리트 구조물에서 균열이 발생하여도 처짐 산정이 가능하다는 장점이 있다. 또한 프리스트레싱 효과와 균열발생을 고려한 중립축의 위치를 모니터링 할 수 있으므로, 확보된 처짐이력과 중립축의 위치변화를 이용하여 구조물의 성능저하를 감지할 수 있었다. 따라서 실제 교량에서 처짐계의 설치가 용이치 않거나 전자기파의 간섭이 심한 교량의 처짐계측에 적용 가능할 것으로 판단된다.

제안된 방법의 검증을 위해 IPC 실물거더 실험체에 광섬유 센서를 설치하고 사용하중의 약 200% 정도까지 재하실험을 실시하였다. 광섬유 센서를 이용하여 계측한 변형률과 기존 전기식 센서를 이용하여 계측한 변형률을 비교하여 본 결과, 광섬유 센서가 전기식 센서와 우수한 연관성을 보임을 알 수 있었다. 또한 구조물의 상하면에 설치된 광섬유 센서를 이용한 곡률 측정방법으로 처짐을 계산한 결과 직접 측정된 처짐값과 6% 이내의 오차를 보였다. 본 연구의 처짐

유추법은 실험을 통해 검증되었듯 비교적 완만한 비선형 거동을 보이는 콘크리트 구조물의 계측 시 적용이 가능하며, 향후 심한 비선형 거동을 보이는 경우의 구조물에 대한 적용성 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 광계환, 김기수, 조선정, 광경현, 김기순 (2002), "광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 철근콘크리트보의 전단-피로 거동에 관한 실험적 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.651-654.
2. 조남소, 김남식, 이상배 (2001), "광섬유 격자 센서를 이용한 남해대교의 처짐 추정", 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.1-4.
3. 김연태 (2002), "광섬유센서를 이용한 콘크리트 보의 변형률측정 및 균열검출에의 적용성", 대한토목학회 논문집, 제22권, 2-A호, 대한토목학회, pp.221-227.
4. Tennyson R.C., Mufti A.A., Rizkalla S., Tadros G., and Benmokrane B. (2001), "Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors", Smart Mater. Struct., Vol.10, pp.560-573.
5. Ansari, F. (1997), "State-of-the-art in the applications of fiber-optic sensors to cementitious composites", Cement and Concrete Composite, Vol.19, pp.3-19.
6. Leung C.K.Y. (2001), "Fiber optic sensors in concrete: the future?", NDT & E International, Vol.34, No.2, pp.85-94.
7. Vurpillot S, Kreuger, G., Benouaich D, Clement D, and Inaudi D (1998), "Vertical deflection of a pre-stressed concrete bridges obtained using deformation sensors and inclinometer measurements", ACI Structural Journal, Vol.95, No.5, pp.518-26.
8. Inaudi D. SOFO System Ver. 6 User Manual. Smartec SA, 1999, Switzerland.
9. Kim, N.S., Cho, N.S. (2004), "Estimating deflection of a simple beam model using fiber Optic Bragg-grating sensors. Experimental Mechanics", Vol.44, No.4, 2004, pp.433-439.