

# 센서유형별 측정 변형률을 이용한 철근콘크리트 보의 처짐추정에 관한 실험적 연구

## An experimental study on estimating deflection of RC beam using resistive strain gauge and fiber optic sensor

이 규 완\*

Lee, Kyu Wan

박 기 태\*

Park, Ki Tae

박 흥 석\*\*

Park, Hung Seok

### Abstract

In the past few years, the nondestructive inspection technology has greatly developed due to the increased necessity to gain a complete understanding of the bridge behavior. Especially, the deformations of bridges contain a lot of informations about its health state. By measuring these deformations it is possible to analyze the loading and aging behavior of the structure. However, the current methods (such as LVDT, dial gage, optical displacement transducer, etc) are often of changeable application on site and have the limitations of installation.

In this paper, the classical beam theory was reviewed and the deflections of structure are estimated using measured strain which is easy to acquire. The applicability of this algorithm is verified by a preliminary steel beam test and two types of concrete beam tests. Also fiber optic sensors as well as resistive strain gages were installed in the concrete beams to establish the applicability of fiber optic sensors in the field of civil engineering.

### 1. 서론

최근 들어 대형구조물의 노후화와 유지·관리 부실로 인한 잇따른 붕괴사고로 말미암아 정기적인 유지관리 및 보수·보강 그리고 공용중이거나 신설되는 구조물의 상태를 평가하기 위한 비파괴 평가 기술의 비약적인 발전이 이루어져 왔다. 그중 외력에 의하여 발생한 실제 변위응답의 측정은 입력하중의 특성을 예측할 수 있게 하거나, 구조물의 상태를 평가하기 위한 가장 정확한 물리량으로 여겨지고 있다. 그러나, 처짐측정시 교고가 높거나 교하공간이 하천이나 바다인 경우 부동점 설치가 곤란하며 지지구조물의 변형에 의하여 오차가 발생되기 쉬우며, 광학측량기를 이용한 비접촉식방법의 경우는 비교적 고가이며 원거리 측정시 정밀도가 상대적으로 낮고 정기적인 계측시 일관성이 결여된다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 본 연구에서는 비교적 측정하기 편리한 구조물의 측정변형률을 이용하여 변위응답의 추정 가능성을 검토하고자 하였다.

또한, 변형률 측정을 위하여 일반적으로 사용되고 있는 전기저항식 변형률 게이지 뿐만 아니라, 전기적 노이즈의 영향을 받지 않으며 시공성 및 내구성이 뛰어난 광섬유센서를 이용하여, 교량의 거동이

\* 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조안전그룹장

력자료의 확보를 위한 안정적이고 정밀한 계측수단으로서 광섬유센서의 적용가능성을 검토하였다.

## 2. 측정변형률을 이용한 처짐추정 알고리즘

측정된 변형률을 이용한 처짐 추정은 재료역학의 기본이론을 근거로 하여 다음과 같이 보의 처짐과 변형률 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{\epsilon_x}{y}$$

여기서,  $v$  : 처짐 곡선     $\epsilon_x$  : 종방향 변형률  
 $y$  : 연단거리 (중립축으로부터의 거리)

단순보유형의 경우 측정변형률의 선형회귀분석과정과 이중적분, 그리고 경계조건을 고려하여 적분 상수를 소거함으로써 처짐곡선식을 얻을 수 있으며, 연속보 유형의 경우는 양단대칭인 부모멘트부에서 기하학적 분리를 실시한 후, 집중하중이 작용하는 단순보와 모멘트만 작용하는 단순보로 분리한 후 선형회귀분석을 수행하여 동일한 알고리즘으로 산정된 두 경우의 처짐값을 합산함으로써 처짐을 추정할 수 있다.

## 3. 실내검증실험

### 3.1 강제시편을 이용한 사전모의 실험

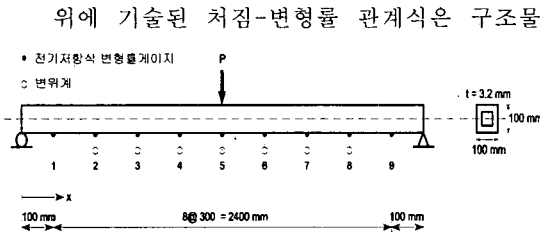


그림 1 단순보 강제시편의 제원 및 센서부착위치

위에 기술된 처짐-변형률 관계식은 구조물이 탄성거동시에만 적용이 가능한 식으로, 콘크리트 보 실험을 수행하기 전 처짐추정의 알고리즘을 검증하기 위하여 재질이 균질하며, 탄성거동을 하는 강제시편을 대상으로 사전모의실험을 실시하였다(그림 1). 표 1에서 보는 바와 같이 강제시편 중앙부의 측정처짐에 대한 추정처짐의 오차율은 8% 미만이었으며, 하중단계가 증가하면서 오차율이 점차로 감소하는 경향을 보인다.

표 1 측정위치 및 하중단계별 오차율 (%)

위치 (mm)	1kNf	2kNf	3kNf	4kNf	5kNf	6kNf	7kNf	8kNf	9kNf	10kNf
400	11.63	11.54	11.03	10.10	9.64	9.48	9.20	9.12	6.95	7.10
700	9.93	9.26	8.95	7.81	7.25	7.01	6.48	6.67	6.37	6.28
1,000	8.60	8.02	7.70	6.57	6.26	5.99	5.47	5.69	5.08	5.19
1,300	6.99	7.71	6.98	6.06	5.37	5.27	4.75	5.18	4.78	4.74
1,600	7.80	8.11	7.84	6.69	6.44	6.14	5.62	5.96	5.46	5.54
1,900	8.99	8.26	8.43	7.73	6.40	6.12	5.57	5.90	5.48	5.37
2,200	-10.14	1.96	-2.28	0.46	-2.17	-3.94	-2.05	-0.54	-1.88	-0.68

$$\text{오차율(\%)} = (\text{측정처짐} - \text{추정처짐}) / \text{측정처짐} \times 100$$

### 3.2 단순보 유형

콘크리트 단순보의 균열발생 전 하중단계인 25kN까지는 탄성거동을 보이며, 위에 기술한 탄성영역의 처짐-변형률 관계식으로부터 처짐을 추정할 수 있다(그림 2, 그림 3). 표 2에 나타난 바와 같이 내부매설형의 경우는 3.5% 미만, 그리고 외부부착형의 경우는 4.5% 미만의 오차율로 처짐을 추정할 수 있었다. 이는 표면재질의 불균질성과 타설시 발생한 공극, 그리고 골재노출로 인한 표면의 요철 등으로 인하여 변형률 측정에 영향을 미치는 외부부착형에 비하여 내부부착형이 더 정확한 변형률 측정이 가능함을 입증하는 것이다.

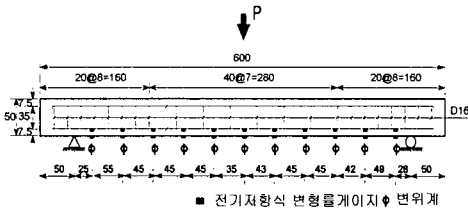


그림 2 콘크리트 단순보 시험체의 제원

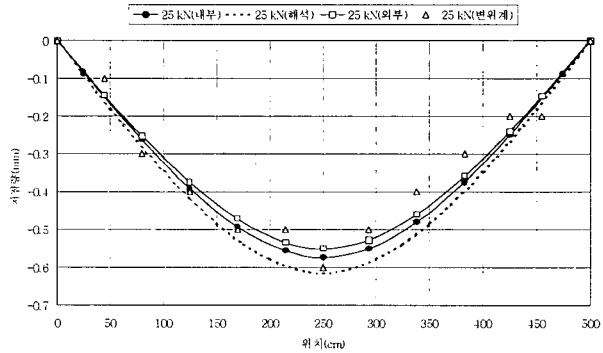


그림 3 하중단계 25kN일 때 처짐비교

표 2 균열발생전 하중단계별 처짐 및 오차율

하중단계	해석처짐(mm)	내부		외부	
		추정처짐(mm)	오차율(%)	추정처짐(mm)	오차율(%)
10kNf	-0.228	-0.236	-3.48	-0.239	-4.58
15kNf	-0.342	-0.348	-1.71	-0.339	1.14
20kNf	-0.457	-0.469	-2.77	-0.453	0.90
25kNf	-0.571	-0.573	-0.45	-0.554	2.93

인장측 콘크리트의 응력이 콘크리트의 휨인장강도(파괴계수)를 초과하면 균열이 발생하며, 이 단계에서부터 하중에 의해 발생하는 인장응력은 전적으로 철근이 부담하게 된다. 그림 4는 콘크리트 시편의 L/2지점 중앙부 내부에 매설한 전기저항식 변형률 게이지의 응답값, 외부에 부착한 전기저항식 변형률 게이지의 응답값, 그리고 변위계로부터 측정된 처짐과 탄성구간에서의 처짐-변형률 관계의 식으로부터 유추한 콘크리트 내부 변형률로, 초기하중단계인 0kN에서 철근의 항복하중인 250kN까지의 변형률 이력을 나타낸 것이다.

그림 4에 나타난 바와 같이 균열이 발생한 인근 내부매설형의 변형률은 콘크리트에서 부담하던 휨인장력을 대신하여 변형률이 급격히 증가하며, 외부부착형의 경우는 이와 반대로 콘크리트가 더이상 인장에 저항하지 못하므로 변형률은 하중이 증가하여도 0에 가까운 값을 가지게 된다. 또한, 외부부착형의 경우 균열발생으로 손상되거나 하중단계별 측정값이 일정하지 않아 균열발생 후 외부부착형은 더 이상 신뢰할 수 없는 결과값을 보인다.

그림 5는 하중단계 40kN일때의 측정위치별 내부매설형의 측정값을 나타낸 것이다. 탄성영역의 측정변형률은 하중제하점을 기준으로 좌우 선형양상을 보이나, 균열발생 후 측정변형률은 균열의 발생위치 및 양상에 따라 좌우 선형성을 보이지 않는다. 즉, 그림 5와 같이 다른 측점에 비하여 균열발생 인

근의 측정변형률은 상대적으로 급격히 증가하여 탄성영역의 처짐-변형률 관계식을 더 이상 적용할 수 없으므로, 그림 5의 평균변형률 응답값에 보정계수를 적용하여 처짐을 추정하여야 한다.

그림 6은 균열발생 후 처짐추정을 위한 실험적 보정계수를 나타낸 것이며, 그림 7은 실험적 보정계수와 해석적 보정계수를 비교한 것이다. 실험적 보정계수/해석적 보정계수의 비가 0.91~1.12로 비교적 유사한 값을 나타내고 있어, 이는 실험을 통한 보정계수가 아닌 해석적인 보정계수를 적용하여 실측된 변형률로부터 비교적 정확하게 처짐을 추정할 수 있음을 입증하는 것이다.

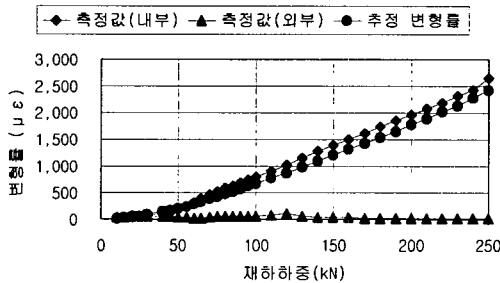


그림 4 하중단계별 변형률이력

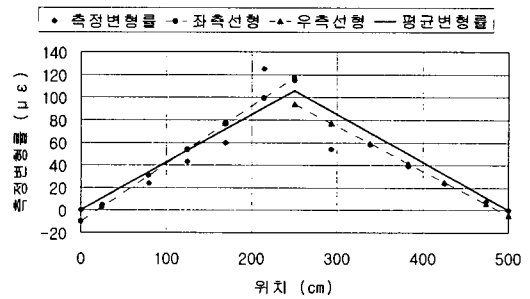


그림 5 균열발생 후 변형률 측정값의 처리방법

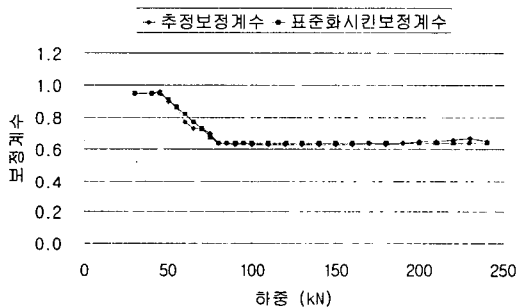


그림 6 균열발생 후 처짐추정을 위한 보정계수

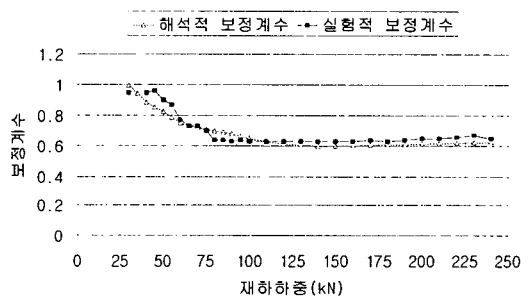


그림 7 해석보정계수와 실험보정계수 비교

### 3.3 연속보 유형

연속보 유형의 처짐추정 알고리즘의 검증과 광섬유센서의 적용성 검토를 수행하기 위하여 그림 8과 같이 전기저항식 변형률 게이지 뿐만 아니라 페브리-페롯 광섬유센서를 이용하여 변형률을 측정 한 후 균열발생 전 탄성영역에서의 처짐추정을 실시하였다. 단순보 유형에 대한 실험결과에서도 언급한 바와 같이 균열발생 후 콘크리트 표면에 부착한 변형률 게이지의 경우는 정밀한 변형률 측정이 불가능하여, 균열발생 후 이를 이용한 처짐의 추정은 불가능하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 탄소 섬유 플레이트(CFRP)를 이용하여 페브리-페롯 광섬유센서와 외부 부착 전기저항식 변형률 게이지를 부착하였으며, 균열 발생 후에도 신뢰성 있는 변형률 측정이 가능하도록 하였다.

표 3은 균열발생 전 탄성영역에서 경간중앙의 처짐추정을 실시한 후 센서유형별로 오차율을 나타낸 것이다. 전반적으로 하중이 증가할수록 오차율이 감소하는 경향을 보이며, CFRP를 이용한 페브리-페롯 광섬유센서의 경우 연속보 실내실험을 위하여 적용된 센서유형 중에서 가장 신뢰성 있는 변형률

측정과 민감도를 가지고 있어, 가장 정확히 구조물의 처짐 추정이 가능하다고 사료된다. 내부매설형의 경우 단순보 유형에 비하여 큰 오차가 발생하였는데, 이는 단순보 유형에 비하여 연속보 유형의 발생처짐이 상대적으로 미세하여 기인된 현상으로 판단된다.

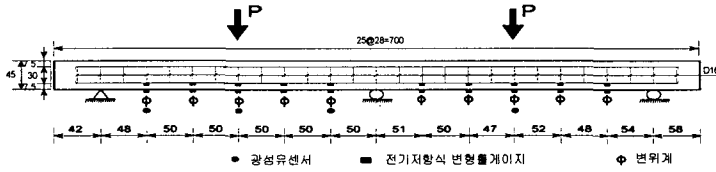


그림 8 콘크리트 연속보 시험체의 제원

표 3 센서종류 및 부착유형에 따른 처짐 및 오차율

하중		해석값	내부매설 변형률 게이지	CFRP 부착 변형률 게이지	CFRP 광섬유센서
30kNf	오차율 (%)		-39.21	-32.65	-12.21
	처짐 (mm)	-0.110	-0.153	-0.146	-0.123
40kNf	오차율 (%)		-33.15	-26.21	-7.01
	처짐 (mm)	-0.146	-0.195	-0.185	-0.156

#### 4. 결론

강재보로부터 측정된 하중별 변형률과 보의 처짐-변형률 관계식을 이용하여 측정변형률로부터 처짐형상의 추정이 가능하였다. 콘크리트 단순보의 경우, 균열 발생전인 탄성영역에서는 강재보와 동일한 방법으로 처짐추정이 가능하였으며, 비탄성영역인 균열발생 후 처짐추정은 측정된 변형률에 대한 보정계수의 적용이 필요하였다. 이상에서 제시한 보정계수는 모든 단면에 대하여 동일하게 적용할 수 있다고 단정할 수 없으며 해석적이고 실험적인 방법에 의하여 꾸준히 고찰되어 균열발생 후에도 적절한 보정계수에 의하여 처짐 추정이 가능하도록 하여야 할 것이다. 또한 변형률을 이용한 처짐추정기법은 균열발생위치 및 진전양상에 따른 보정계수 이론이 정립되지 않는 한 공용중인 교량에 적용하기에는 어려움이 있다고 판단되며, 신설교량에 적용하여 공용연수 경과에 따른 상대적인 처짐 측정에 좀더 적합할 것으로 사료된다.

연속보 유형의 경우 제시된 알고리즘에 의하여 처짐추정이 가능하였으며, 전기저항식 변형률 게이지에 비하여 CFRP를 이용한 광섬유센서가 가장 신뢰성 있는 변형률 측정과 민감도를 가지고 있어, 교량 거동이력자료의 확보를 위한 안정적이고 정밀한 계측수단으로서 광섬유센서의 적용이 가능한 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 '99 산학연 연구개발 사업의 1차년도 연구내용의 일부이며 이에 대한 지원에 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. 김남식, "광섬유 변형률계를 이용한 교량의 수직처짐 추정", 대형구조물의 건전성 감시 및 평가기술 워크샵, 2000.
2. 홍창선 외, "광섬유센서를 이용한 스마트 구조물의 안전진단기술", 대한기계학회지, 1997. 6.
3. 이의득 외, "교량상부구조의 가속도 실측치를 이용한 동적변위응답의 추정", 대형 구조물의 건전성 감시 및 평가기술 워크샵, 2000.
4. 권일범 외, "광섬유 마이켈슨 센서에 의한 RC보의 변형률 측정 및 파손의 검출", 한국구조물진단학회 제3권 제3호, 1999.
5. D. Inaudi, "Field testing and application of fiber optic displacement sensors in civil structures", 12th international conference on OFS '97-Optical Fiber Sensors, Williamsburg, 1997. 10.
6. S. Vurpillot, D. Inaudi, A. Scano, "Mathematical Model for the Determination of the Vertical Displacement from Internal Horizontal Measurements of a Bridge", Smart Structures and materials, Vol. 2719, SPIE, San Diego, 1996. 2.
7. D. Inaudi, N. Casanova, P. Kronenberg, S. Marazzi, S. Vurpillot, "Embedded and Surface Mounted Fiber Optic Sensors for Civil Structural Monitoring", Vol. 3044, SPIE, San Diego, 1997. 3.