

광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 R.C보의 계측 시스템 개발

Development of Measuring Data System for Reinforced Concrete Beam Using Fiber Bragg Grating Sensors

곽계환*
Kwak, Kae Hwan

장화섭**
Jang, Hwa Sup

양동운***
Yang, Dong Oun

ABSTRACT

Fiber Bragg Grating (FBG) Sensors as advanced measuring system are introduced and actively being applied to establish a smart monitoring system for bridge maintenance. This study develops FBG sensors and suggests a smart monitoring system. As for its first step, to verify the reliability of FBG sensors that developed, a specimen is made FBG sensors and electric sensor are attached. Then, Static test is conducted on the specimen on the specimens to check reliability. In addition, this study estimates the optimum deflection curve that converts strain curve data measured by FBG sensors into deflection.

1. 서론

교량의 유지관리를 위한 스마트 모니터링 시스템의 구축을 위하여 발전하고 있는 첨단 계측 시스템인 광섬유 브래그 격자 센서는 광섬유 자체의 물리적 변화를 기초로 하여 센서에 가해진 물리량을 측정하기 때문에 한가지 측정이 가능하다. 또한, 광섬유 자체가 전송선의 역할을 담당하기 때문에 응용방법에 따라 하나의 단일 광섬유를 이용하여 여러 부위에서의 측정이 가능하며, 전자기 간섭이나 온도 와 같은 외부 환경에 영향을 받지 않는다. 일반적으로 전기저항식 센서가 가지고 있는 노이즈 현상 또한 거의 없어 계측센서로서 현재 많은 각광을 받고 있다.

이에 본 연구에서는 광섬유 브래그 격자 센서를 개발하고, 교량의 유지관리 스마트 모니터링 계측 시스템을 제안하고자 한다. 그 첫 번째 단계로서, 개발된 광섬유 브래그 격자 센서의 신뢰성을 검증하기 위하여 시험체를 제작하여 광섬유 브래그 격자 센서와 전기저항식 센서를 시험체의 철근과 콘크리트에 부착하여 정적시험을 실시한다. 정적시험 결과, 하중과 변형을 관계를 전기저항식 센서와 광섬유 브래그 격자센서와의 비교, 분석을 실시하며 또한 광섬유 브래그 격자 센서에서 측정된 변형률을 처짐으로 환산하기 위한 함수식을 제안하고 최적의 처짐곡선식을 도출하였다. 제안된 함수식의 신뢰도는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)와의 비교를 통하여 입증하였다.

2. 시험체의 개요

본 시험의 배합설계는 다음과 같다.

표1. 배합설계표

Type	Max Size (mm)	Slump (mm)	Air (%)	W/C	S/a	Unit Volume(kg/m ³)				
						W	C	S	G	SP (g/m ²)
RC	25	10	2	42.5	45.7	156.24	443	711.24	951.83	0

철근콘크리트보의 시편제작은 다음과 같다.

- 1) 국내 콘크리트 시방서를 기준으로 강도설계법으로 계산하였다. ($f_{ck} = 27MPa$, $f_y = 400MPa$)
- 2) 정적시험기의 재하능력에 맞도록 15ton의 하중이 지간 중앙점에 재하 될 때의 최대 휨모멘트와 전단력을 사용하여 설계하였다.
- 3) 설계된 시편의 소요 휨모멘트를 검토한 결과 122.79kN에서 파괴되는 것으로 예상하였다.

* 정회원 · 원광대학교 토목환경, 도시공학부 교수
 ** 정회원 · 원광대학교 토목환경공학과 박사과정
 *** 정회원 · 원광대학교 토목환경공학과 석사과정

표2. 시험체 명칭 및 제원

종류	시편명	압축강도(MPa)	시편제원(mm)	전단지간길이비
정적시험	SS-1	27	15×30×190	0.8
	SS-2	27	15×30×190	0.8

2.1 시험방법

실험에 사용된 Gauge는 철근에 strain gauge 6개와 FBG 센서를 6개를 부착하여, 각 위치마다의 철근의 변형률 값을 측정하였고, 지간 중앙과 300mm(왼쪽기준)에 LVDT와 FBG 센서를 부착하여 처짐을 측정하였다. 실험방법은 하중 980kN 용량의 피로실험기를 이용하여 하중제어(Lost-pos)방식으로 실험을 실시하고 하중속도는 KS F 2408의 규정에 의해 매분 0.9-1MPa의 속도로 하중을 가하였다.

3. 정적시험 결과

3.1 철근의 하중-변형률 관계

광섬유 브래그 격자 센서와 전기저항식 센서로 수집된 하중과 변형률과의 데이터를 분석해 보면, SS1의 경우 광섬유 브래그 격자 센서의 오차율이 6.8%~13% 정도로 전기저항식 센서와 비교해 볼 때 데이터를 비교적 정확하게 측정되었음을 확인하였다. 또한 SS2의 경우도 마찬가지로 광섬유 브래그 격자 센서의 오차율이 5.8%~8.2% 정도로 전기저항식 센서와 비교해 볼 때 비교적 데이터를 정확하게 측정되었음을 확인하였다.

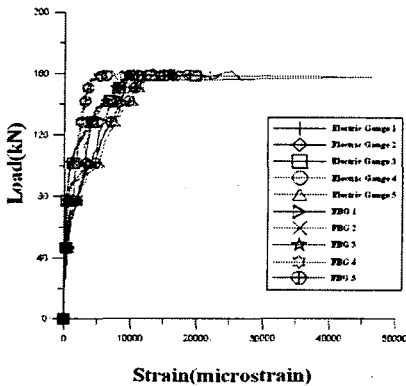


그림 1. SS-1 Load-Strain

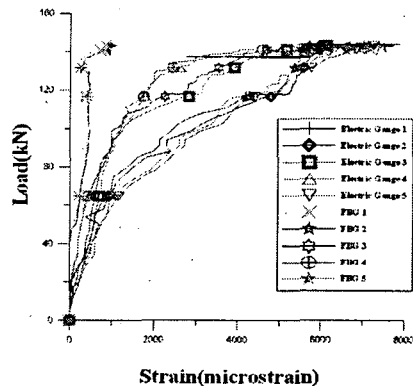


그림 2. SS-2 Load-Strain

3.2 하중-처짐 관계

광섬유 브래그 격자 센서로 측정된 변형률을 이용하여, 철근콘크리트보의 처짐곡선을 추정하기 위하여 시험시편의 정적 재하시험을 통하여 측정된 변형률에 대해 각 하중단계별로 회귀분석을 수행하여 변형률에 관한 함수를 결정하였다. 결정된 함수들을 LVDT값과 비교하면 다음과 같다.

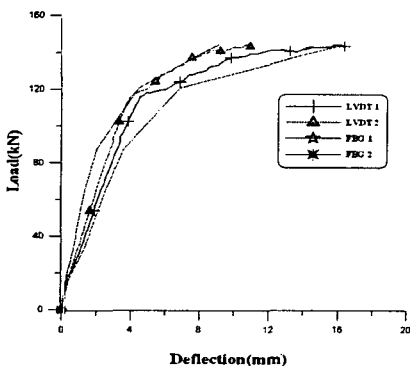


그림 3. SS1 Load-Deflection

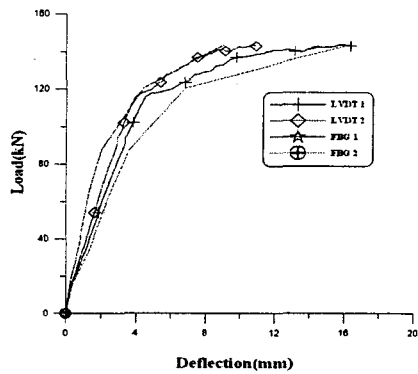


그림 4. SS2 Load-Deflection

광섬유 브래그 격자 센서에 의해 측정된 변형률 데이터를 이용하여 추정된 처짐곡선과 LVDT의 처짐곡선을 비교해 볼때 하중에 따른 처짐 양상은 일치하고 있으나, 정확도 측면에서는 다소 오차가 발생하는것을 확인할 수 있었다. 따라서 좀 더 정확한 처짐곡선 추정을 위해 SPSS 프로그램을 이용하여 분석을 다시 실시하였다.

3.2.1 시간중양점의 최적의 처짐 함수 추정 결과

최적의 처짐곡선 추정결과 Cubic function, Compound function, Power function, Growth function, Logistic function 함수가 주어진 데이터와 가장 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 위의 함수들을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

- ▷ Cubic function : $v(x) = -1.9971 + 0.2442x - 0.0044x^2 + 2.6E-05x^3$
 - ▷ Compound function : $v(x) = 0.4371 \times 1.0252^x$
 - ▷ Power function : $v(x) = 0.0189 \times x^{1.2499}$
 - ▷ Growth function : $v(x) = \exp(-0.8275 + 0.0249x)$
 - ▷ Logistic function : $v(x) = (2.2876 \times 0.9754^x)^{-1}$
- 여기서 x는 하중(kN), v(x)는 처짐(mm) 이다.

위의 함수들을 LVDT에 의해 측정된 데이터와의 비교를 통하여 최적의 처짐추정곡선을 찾을수 있다.

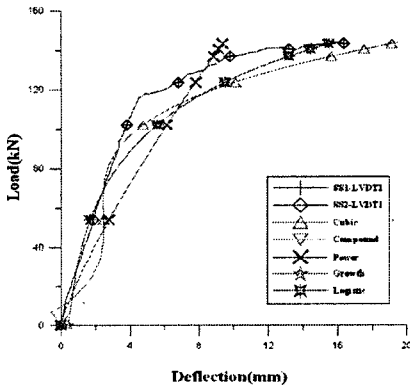


그림 5. 시간중양지점 처짐 추정

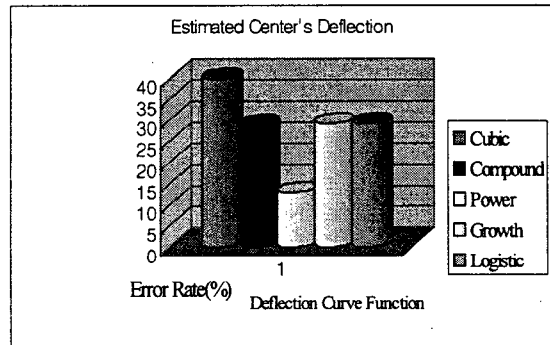


그림 6. 처짐추정식의 오차율

광섬유 브래그 격자 센서의 변형률 데이터를 이용한 처짐추정식 산정결과 Power function 이 다른 함수들에 비해 오차율이 10%정도로 낮게 분석되었다. 따라서, 단경간보의 중앙지점의 처짐추정식을 $v(x) = 0.0189 \times x^{1.2499}$ 으로 산정 할 수 있다.

3.2.2 300mm지점의 최적의 처짐 함수 추정 결과

왼쪽 지점에서 300mm 위치한 지점의 최적의 처짐곡선 추정결과 Cubic function, Compound function, Power function, Growth function, Logistic function 함수가 주어진 데이터와 가장 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 위의 함수들을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

- ▷ Cubic function : $v(x) = -0.7342 + 0.1011x - 0.0019x^2 + 1.2E-05x^3$
 - ▷ Compound function : $v(x) = 0.2356 \times 1.0257^x$
 - ▷ Power function : $v(x) = 0.0103 \times x^{1.2581}$
 - ▷ Growth function : $v(x) = \exp(-1.4456 + 0.0254x)$
 - ▷ Logistic function : $v(x) = (4.2443 \times 0.9749^x)^{-1}$
- 여기서 x는 하중(kN), v(x)는 처짐(mm) 이다.

위의 함수들을 LVDT에 의해 측정된 데이터와의 비교를 통하여 최적의 처짐추정곡선을 찾을수 있다.

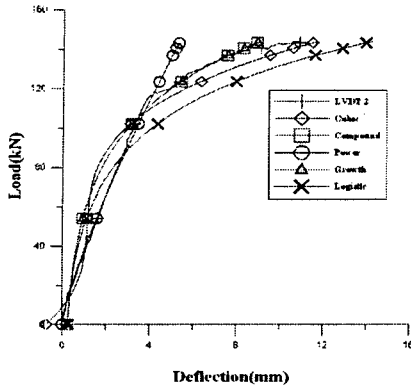


그림 7. 300mm 지점의 처짐곡선 추정결과

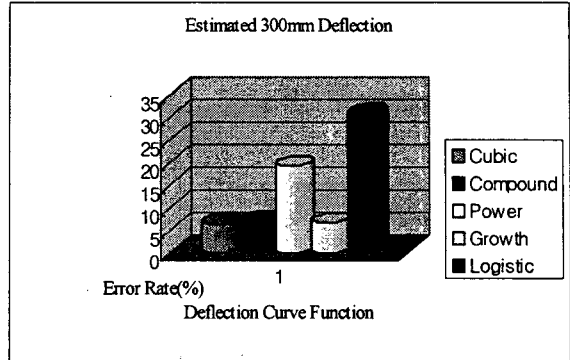


그림 8. 처짐추정식의 오차율

광섬유 브래그 격자 센서의 변형률 데이터를 이용한 300mm 지점(왼쪽기준)의 처짐추정식 산정결과 Cubic function, Compound function, Growth function 함수가 오차를 6%정도로 거의 비슷하였으나, 그 중 Cubic function가 오차를 6.591%로 가장 낮게 분석되었다. 따라서, 단경간보의 300mm지점의 처짐추정식을 $v(x) = -0.7342 + 0.1011x - 0.0019x^2 + 1.2E-05x^3$ 으로 산정 할 수 있다.

4. 결론

FBG센서를 철근콘크리트보에 대한 변형률 계측 및 처짐추정 센서로서 효용성과 신뢰성을 입증하기 위하여 Electric Sensor와 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하중과 변형률 관계에서 Electric Gauge 와 FBG 센서의 형상이 거의 일치하였으며, 정량분석한 결과 SS1의 경우 광섬유 브래그 격자 센서의 오차율이 6.8%~13%정도로 전기저항식 센서와 비교해 볼 때 데이터가 비교적 정확하게 측정되었음을 확인하였다. 또한 SS2의 경우도 마찬가지로 광섬유 브래그 격자 센서의 오차율이 5.8%~8.2%정도로 전기저항식 센서와 비교해 볼 때 비교적 데이터를 정확하게 측정되었음을 확인하였다.
- 2) 하중과 처짐관계에서 중앙처짐의 경우, 광섬유 브래그 격자 센서의 변형률 데이터를 이용한 처짐 추정식 산정결과 Power function이 다른 함수들에 비해 오차율이 10%정도로 낮게 분석되었다. 따라서, 단경간보의 중앙지점의 처짐추정식을 $v(x) = 0.0189 \times x^{1.2499}$ 으로 산정 할 수 있다.
- 3) 하중과 처짐관계에서 300mm(왼쪽지점기준)의 경우, 광섬유 브래그 격자 센서의 변형률 데이터를 이용한 300mm 지점(왼쪽기준)의 처짐추정식 산정결과 Cubic function, Compound function, Growth function 함수가 오차를 6%정도로 거의 비슷하였으나, 그 중 Cubic function가 오차를 6.591%로 가장 낮게 분석되었다. 따라서, 단경간보의 300mm지점의 처짐추정식을 $v(x) = -0.7342 + 0.1011x - 0.0019x^2 + 1.2E-05x^3$ 으로 산정 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가연구원 지정 R&D(03-산학연 A02-04)연구비 지원에 의해 연구되었습니다.

참고문헌

Kwak, K. H., Cho. S. J. and Lee. S. J. "Smart Monitoring of Bridge Maintenance Using Fiber Bragg Grating Sensors", Proceeding of the 2th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, pp273, 2004

Hill, K. O., Fujji, Y., Johnson, D. C. & Kawasaki, B. S. "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication", Appl. Phys. Lett.,32(1978) 647-649

KAIST, "Structure pre-detecting system using fiber grating", June, 1999

Fiber lattice: Lattice Principle and application pp31-47, Electricity Society, The 40th Edition No.12, December, 1997

Hocker G. B.(1994) Fiber Optic Sensing of Pressur and Temperature, SPILE MILESTONE SERIES MS pp440