

FBG센서를 이용한 반복하중을 받는 RC보의 계측 시스템 개발

Development of Measuring Data System of Reinforced Concrete Beam Under Cyclic Loading Using Fiber Bragg Grating Sensors

곽계환*, 장화섭**, 정현수**, 양동운***

Kwak, Kae-Hwan · Jang, Hwa-Sup · Jung, Hyun-Soo · Yang, Dong-Oun

ABSTRACT

In this study, strain measurement and its applicability to estimated deflection curve using fiber bragg grating sensors was conducted. For this purpose, reinforced concrete beams were made and sensors were attached both on the surface of the beams and inside steel. Two types of sensors were used to detect strain on the beams and steel : fiber bragg grating sensors, electric resistance strain sensors. So fatigue test is done with measuring strain of specimen. In addition, this experiments estimates the optimum deflection curve that converts strain curve data measured by FBG sensors into deflection.

1. 서 론

교량의 유지관리를 위한 스마트 모니터링 시스템의 구축을 위하여 발전하고 있는 첨단 계측 시스템인 광섬유 브래그 격자 센서의 도입과 적용이 현재 활발하게 진행되고 있다. 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 온도와 같은 외부환경에 영향을 받지 않는다.

본 연구에서는 이러한 광섬유 브래그 격자 센서의 신뢰성을 검증하기 위하여 철근콘크리트보의 피로시험을 실시하여 반복하중에 따른 철근과 보의 변형률을 측정하였다. 측정된 철근의 변형률은 전기저항식 센서의 데이터와 비교를 통하여 오차율을 분석하였다. 또한, 보의 중앙과 30mm지점(왼쪽지점)에도 변형율을 측정하여 본 연구에서 제안한 처짐곡선 추정식을 이용하여 최적의 처짐곡선을 추정하였다. 추정된 처짐곡선은 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)에서 측정된 처짐값과의 비교를 통하여 신뢰성을 입증하였다.

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

2. 변형율을 이용한 처짐추정 기본 이론

곡률과 보의 처짐에 관한 미분방정식은 다음 식(1)과 같다.

$$K(x) = \frac{d^2v(x)}{dx^2} \quad (1)$$

여기서, $K(x)$ 와 $V(x)$ 는 각각 보의 종방향에 따른 곡률과 수직처짐을 나타낸다. 또한 곡률과 휨변형률과의 관계는 아래 식(2)와 같이 얻을 수 있다.

$$K(x) = \frac{\epsilon(x)}{y} \quad (2)$$

여기서, y 는 보 단면의 중립축으로부터 연단거리를 나타낸다. 따라서, 식(1)과 (2)로부터 처짐과 변형률과의 상호관계는 식(3)과 같이 성립된다.

$$\frac{d^2v(x)}{dx^2} = \frac{\epsilon(x)}{y} \quad (3)$$

식 3.3의 양변을 두 번 적분하면 아래의 식(4)와 같은 함수형태를 얻을 수 있다.

$$v(x) = \iint K(x) dx dx = \iint \left(-\frac{\epsilon(x)}{y}\right) dx dx = K(x) + C_1x + C_2 \quad (4)$$

여기서 $K(x)$ 는 곡률함수 $k(x)$ 를 두 번 적분한 함수이며, C_1 과 C_2 는 보의 경계조건에 따라 얻어지는 적분 상수이다.

식(4)에서 얻어진 바와 같이 처짐곡선 $v(x)$ 은 휨변형률 $\epsilon(x)$ 에 대한 함수로 나타나며, 연단거리 \bar{y} 와 적분 상수 C_1, C_2 는 대상 구조물에 따라 상수로써 결정된다. 따라서 제한된 측정점에서 얻어진 계측변형률 값에 대한 회귀 분석을 수행하여 가정한 처짐형상함수의 형태를 갖게 하면 결과적으로 처짐곡선을 얻을 수 있다.

임의의 하중 P 에 의해 보에 작용하는 변형률 값을 제한된 측정점에서 얻었을 경우, 회귀 분석을 수행하면 보의 중심에 대해 대칭을 이루는 1차 함수형태 $Ax+B(0 \leq x \leq L/2)$ 로 표현 가능하여 변형률 함수 $\epsilon(x)$ 를 얻는다. 또한 식(3)에서와 같이 곡률함수 $K(x)$ 역시 $A^*x+B^*(0 \leq x \leq L/2)$ 의 1차 함수형태가 된다. 여기서, $A^* = -A/\bar{y}$ 이며 $B^* = -B/\bar{y}$ 이다. 이를 식(4)에 대입하면 다음의 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$v(x) = \iint (A^*x+B^*) dx dx = \frac{1}{6} A^*x^3 + \frac{1}{2} B^*x^2 + C_1x + C_2 \quad (5)$$

여기서 지점에서의 변형률은 발생하지 않기 때문에 $B^* = 0$ 이고, 처짐곡선에 대한 경계조건 $v(0)=0, v'(L/2)$ 를 적용하면 식(6)과 같이 처짐곡선함수를 얻는다.

$$v(x) = \frac{1}{6} A^*x^3 - \frac{1}{8} A^*L^2x \quad (0 \leq x \leq L/2) \quad (6)$$

결과적으로 측정된 변형률 값의 분포 양상으로부터 식(6)의 A^* 를 결정하면 단순보의 처짐곡선을 얻을 수 있다.

3. 시험 개요

3.1 시험체의 제작

본 실험에서 사용한 시멘트는 S 주식회사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 잔골재의 비중은 2.62이고 조립율은 2.72인 백마강 강모래였고 굵은골재의 최대치수는 25mm이었다. 철근은 주철근 직경이 19mm, 전단보강철근 직경이 10mm 이고 설계기준강도는 27MPa 이었다.

표1. 배합설계표

종류	Max Size (mm)	Slump (cm)	공기량 (%)	W/C	s/a	Unit Volume(kg/m ³)				
						W	C	S	G	SP (g/m ³)
RC	25	10	2	42.5	45.7	156.24	443	711.24	951.83	866

철근콘크리트보의 시편제작은 다음과 같다.

- 1) 국내 콘크리트 시방서를 기준으로 강도설계법으로 계산하였다. ($f_{ck}=27\text{MPa}$, $f_y=400\text{MPa}$)
- 2) 피로실험기의 재하능력에 맞도록 15ton의 하중이 지간 중앙점에 재하 될 때의 최대 휨모멘트와 전단력을 사용하여 설계하였다.
- 3) 설계된 시편의 소요 휨모멘트를 검토한 결과 122.794kN 에서 파괴되는 것으로 예상하였다.

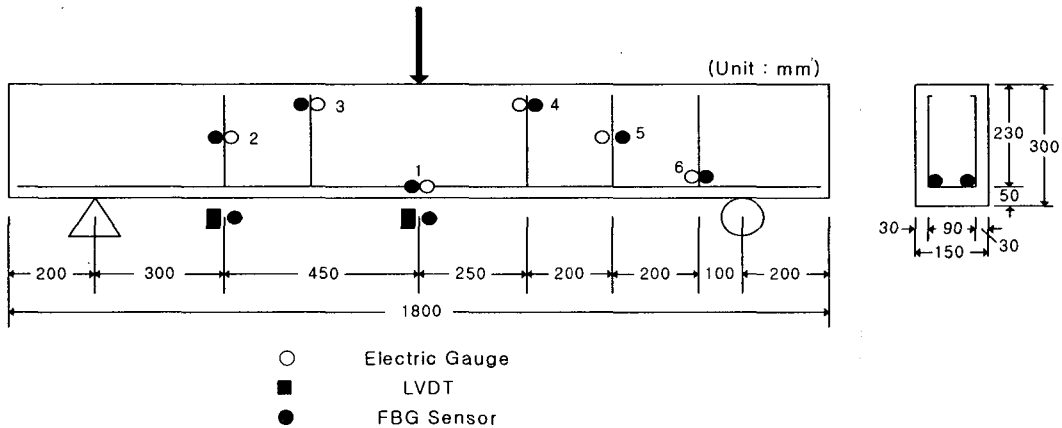


그림1. 계측센서의 매설위치 및 단면제원

시편은 총 3개를 제작하여 피로시험을 실시하였다. 피로시험용 시편의 명칭은 FS-1, FS-2, FS-3로 명명하였다.

3.2 시험방법

본 연구의 피로시험은 하중 조절 방식으로 실시하며 반복과형은 정현파(sine)형태로 하여 자동제어 되도록 하며, 첫하중은 반복하중 범위의 중간값까지 선형으로 증가시킨 후, 반복하중이 재하되는 방식을 사용하였다. 재하속도는 5Hz(300cycles/min)을 기준으로 하였으며, 응력비 R=0.1로 일정하게 고정하여 실험을 실시하였다. 측정횟수는 100회, 1000회, 10000회, 20000회, 50000회, 100000회 그리고 매 10만회에서 측정하는 것을 원칙으로 하였으며, 반복횟수에 따른 철근의 변형을 관계, 보의 처짐관계등을 관찰하였다.

4. 실험 결과

4.1 반복횟수에 따른 철근의 변형을 관계

피로시험을 위한 시편 FS-1, FS-2, FS-3에 의해 구한 반복횟수에 따른 전기저항식센서와 광섬유 브래그 격자 센서에 의해 수집된 데이터를 분석하면 다음과 같다.

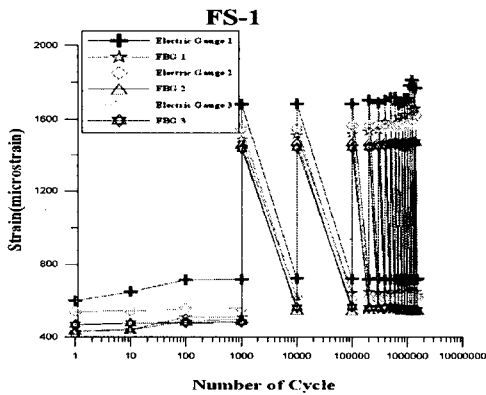


그림 2. FS-1시편의 반복횟수에 따른 변형을 관계

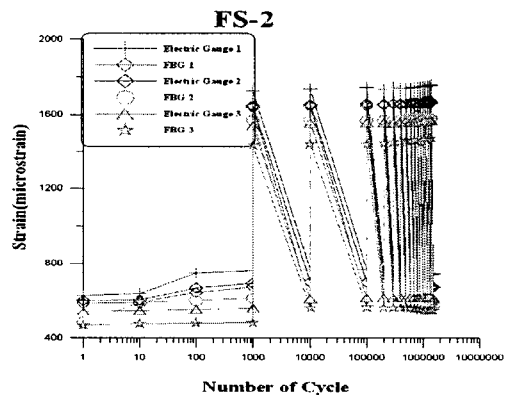


그림 3. FS-2시편의 반복횟수에 따른 변형을 관계

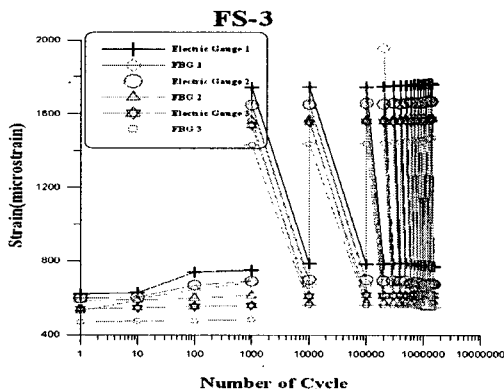


그림 4. FS-3시편의 반복횟수에 따른 변형을 관계

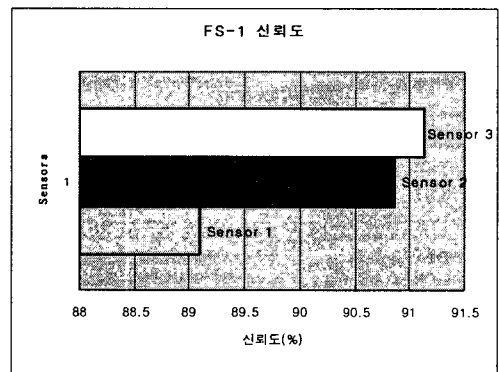


그림 5. FS-1의 FBG센서 신뢰도

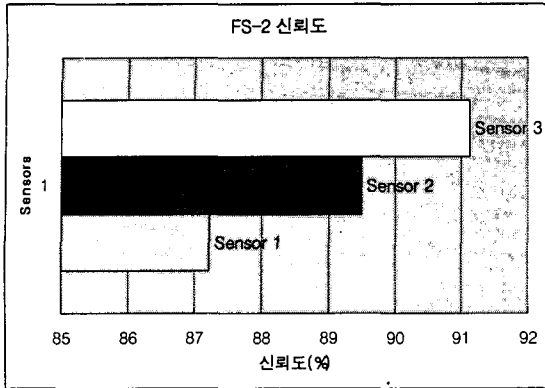


그림 6. FS-2의 FBG센서 신뢰도

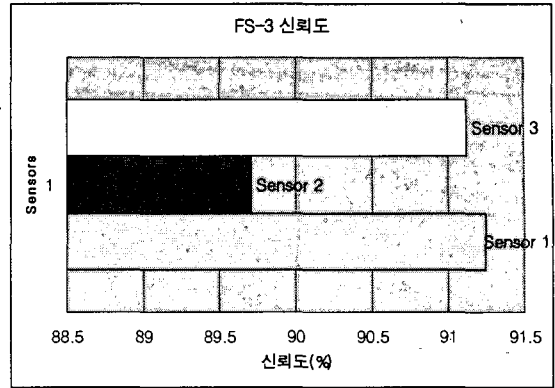


그림 7. FS-3의 FBG센서 신뢰도

$$* \text{신뢰도} = 100 - \left[\left(\frac{\text{FBG센서} - \text{전기저항식센서}}{\text{FBG센서}} \right) \times 100 \right]$$

반복횟수에 따른 철근의 변형률의 데이터를 분석한 결과 FS-1의 경우 전기저항식센서와 비교해 볼 때 신뢰도가 89%-91% 정도로 FBG센서의 데이터 측정값이 비교적 잘 일치하였으며, FS-2의 경우도 87%-91% 정도의 신뢰도를 가지고 있음을 확인하였다. FS-3의 경우, 센서 2의 경우만 10%를 넘는 오차율을 나타내고 있었으며, 신뢰도의 범위는 89%-91% 정도로 분석되었다.

4.1 반복횟수에 따른 보의 처짐 관계

반복횟수에 따른 LVDT와 광섬유 브래그 격자 센서에 의해 수집된 변형률을 처짐으로 환산하여 처짐추정식으로 구한 데이터를 분석하면 다음과 같다.

광섬유 브래그 격자 센서로 측정된 변형율을 이용하여, 반복횟수에 따른 철근콘크리트보의 처짐곡선을 추정하기 위하여 시험시편의 동적 재하시험을 통하여 측정된 변형률에 대해 각 반복횟수별로 회귀분석을 수행하여 변형률에 관한 함수를 결정하였다. 표2는 광섬유 브래그 격자 센서에 의해 측정된 변형율을 선형회귀분석하여 얻은 변형률 함수를 나타내고 있다.

표2. 광섬유 브래그 격자 센서의 측정변형율에 의한 처짐곡선 추정

Number of Cycle	v(x)
1	$v(x) = -0.000000001x^3 + 0.00397375x$
10	$v(x) = -0.000000002x^3 + 0.004335x$
100	$v(x) = -0.000000002x^3 + 0.00469625x$
1000	$v(x) = -0.000000002x^3 + 0.0048797x$
10000	$v(x) = -0.000000002x^3 + 0.0050575x$
100000	$v(x) = -2.4756E-09x^3 + 0.005366x$

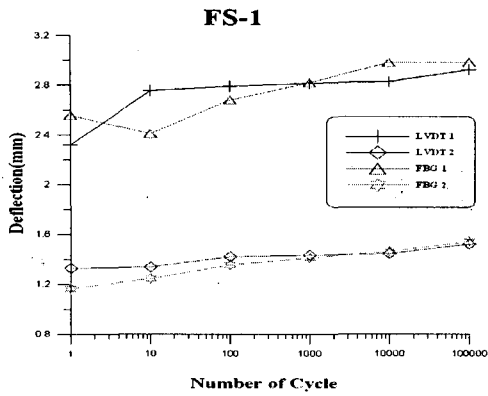


그림 8. FS-1의 LVDT 처짐값과 FBG센서 처짐추정값

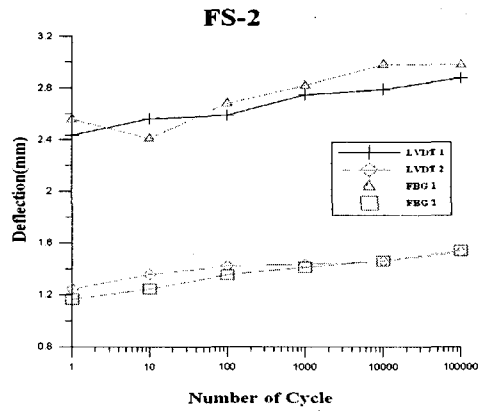


그림 9. FS-2의 LVDT 처짐값과 FBG센서 처짐추정값

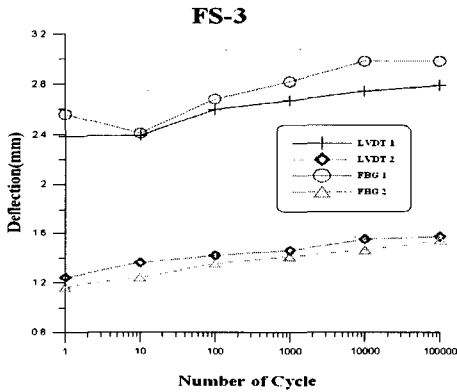


그림 10. FS-3의 LVDT 처짐값과 FBG센서 처짐추정값

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 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 최적의 처짐곡선 추정을 위해 SPSS 프로그램을 이용하여 최적의 함수식을 도출하였다.

4.1.1 시간 중앙점의 최적의 처짐추정(FBG1, LVDT1)

중앙지점의 최적의 처짐곡선 추정결과 Inverse function, S function 함수가 주어진 데이터와 가장 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 위의 함수들을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

▷ Inverse function : $v(n) = 2.7853 + (-0.2631/n)$

▷ S function : $v(n) = \exp(1.0214 + (-0.0957/n))$

여기서 n는 반복횟수, v(x)는 처짐(mm) 이다.

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

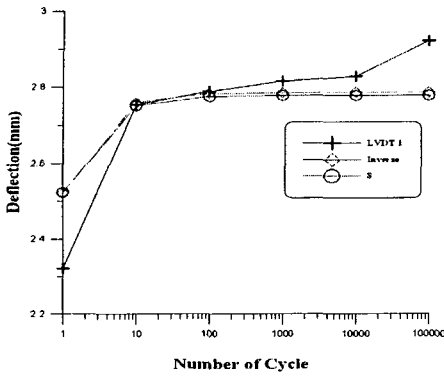


그림 11. 중간중양지점 처짐 추정

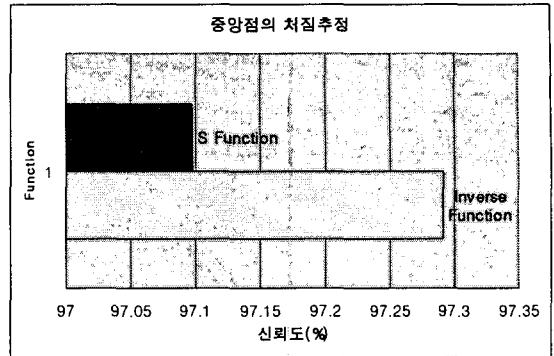


그림 12. 처짐추정식의 신뢰도

광섬유 브래그 격자 센서의 변형률 데이터를 이용한 반복횟수에 따른 처짐식 추정결과 Inverse Function 이 S Function에 비해 신뢰도가 97.7%정도로 좀더 높게 분석되었다. 따라서, 단경간보 중앙지점의 반복횟수에 따른 처짐추정식을 $v(n) = 2.7853 + (-0.2631/n)$ 으로 산정 할 수 있다.

4.1.2 300mm지점(왼쪽기준) 최적의 처짐추정(FBG2, LVDT2)

300mm점의 최적의 처짐곡선 추정결과 Logarithmic function, Power function함수가 주어진 데이터와 가장 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 위의 함수들을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

▷ Logarithmic function : $v(n) = 1.1784 + 0.0322 \times \ln(n)$

▷ Power function : $v(n) = 1.1833 \times n^{0.0239}$

여기서 n는 반복횟수, v(x)는 처짐(mm) 이다.

위의 함수들을 LVDT에 의해 측정된 데이터와의 비교를 통하여, 300mm지점의 최적 처짐추정곡선을 찾을 수 있다.

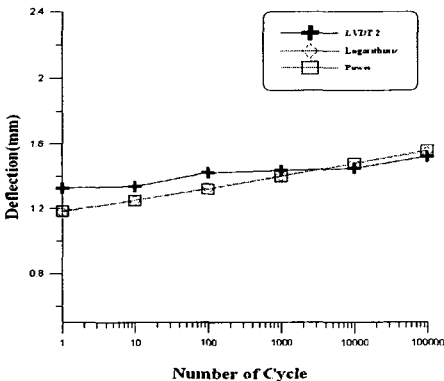


그림 13. 300mm지점 처짐 추정

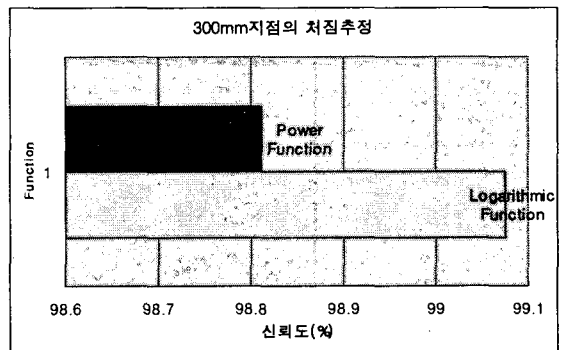


그림 14. 처짐추정식의 신뢰도

광섬유 브래그 격자 센서의 변형률 데이터를 이용한 반복횟수에 따른 300mm 지점의 처짐식 추정결과 Logarithmic Function 이 Power Function에 비해 신뢰도가 99%정도로 높게 분석되었다. 따라서, 300mm지점의 반복횟수에 따른 처짐추정식을 $v(n) = 1.1784 + 0.0322 \times \ln(n)$ 으로 산정 할 수 있다.

5. 결론

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

- (1) 반복횟수에 따른 철근의 변형률의 데이터를 분석한 결과 FS-1의 경우 전기저항식센서와 비교해 볼 때 신뢰도가 89%~91%정도로 FBG센서의 데이터 측정값이 비교적 잘 일치하였으며, FS-2의 경우도 87%~91%정도의 신뢰도로 분석되었다. FS-3의 경우, 센서 2의 경우만 10%를 넘는 오차율을 나타내고 있었으며, 신뢰 범위는 89%~91% 정도로 분석되었다.
- (2) 광섬유 브래그 격자 센서의 변형률 데이터를 이용한 반복횟수에 따른 중앙지점의 처짐식 추정결과 Inverse Function 이 S Function에 비해 신뢰수준이 97.7%정도로 높게 분석되었다. 따라서, 단경간보 중앙지점의 반복횟수에 따른 처짐추정식을 $v(n) = 2.7853 + (-0.2631/n)$ 으로 산정 할 수 있다.
- (3) 광섬유 브래그 격자 센서의 변형률 데이터를 이용한 반복횟수에 따른 300mm 지점의 처짐식 추정결과 Logarithmic Function 이 Power Function에 비해 신뢰수준이 99%정도로 높게 분석되었다. 따라서, 300mm지점의 반복횟수에 따른 처짐추정식을 $v(n) = 1.1784 + 0.0322 \times \ln(n)$ 으로 산정 할 수 있다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 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
2. Hill, K. O., Fujii, Y., Johnson, D. C. & Kawasaki, B. S. "Photosensitivity in optical fiber waveguides : application to reflection filter fabrication", Appl, Phys, Lett.,32(1978)647-649
3. KAIST, "Structure pre-detecting system using fiber grating" June, 1999
4. Fiber lattice : Lattice Principle and application PP 31-47, Electricity Society, The 40th Edition No 12, December, 1997
5. 권일범, 김치엽, 유정애, "다중화된 광 손실형 광섬유 센서에 의한 변위의 측정", 한국전산구조공학회 03가을 학술발표회, pp556-565, 2003