

도로교 안전관리 모니터링 시스템의 입력하중 측정을 위한 FBG 기반 하중 측정시스템 개발에 관한 연구

이규완* · 한종욱** · 김철영*** · 박영석****

Lee, Kyu Wan*, Han, Jong Wook**, Kim, Chul-Young***, Park, Young Suk****

A Study on the Development of FBG-Based Load Measurement System for Structural Health Monitoring of Highway Bridge

ABSTRACT

A long-term bridge monitoring system has been introduced and is under operation for long-term safety management of the structure. However, it is difficult to assess the condition of the quantitative structural system as it only measures responses and does not measure input loads. To overcome these shortcomings, FBG (Fiber Bragg Grating)-based input load measurement sensors were developed in this paper for measuring highway bridge input loads and their validity was verified through laboratory tests.

Key words : Weigh-in-motion, Structural health monitoring, Bridge, Fiber optic sensor

초 록

구조물의 장기적인 안전관리를 위하여 교량 장기계측시스템이 도입되어 운영 중에 있다. 그러나 일반적인 교량 장기계측시스템은 응답만 측정하고 입력하중은 측정하지 못하고 있기 때문에, 추세분석에 의한 관리기준 상회여부만을 판단하고 있어 정량적인 구조계의 상태평가가 어려운 실정이다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 도로교 입력하중 측정을 위한 FBG 기반 입력하중 측정센서를 개발하였으며, 실내실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

검색어 : 입력하중 측정 시스템, 장기계측 시스템, 교량, 광섬유 센서

1. 서론

교량계측의 궁극적인 목적은 구조물의 결함 및 손상에 대한 강도저하를 추정하고 건전성을 평가하는데 있다. 중차량 통과에 의하여 교량은 심각한 손상이 유발될 수 있기 때문에 주요 교량에서는 유지관리 모니터링 시스템을 구축하여 장기계측을 실시하고 있다.

이론적으로는 입력하중과 응답을 측정하여야 구조물의 정량적인 상태평가가 가능하지만, 현재 교량 장기계측 시스템은 일반적으로 입력하중은 측정하지 않고 응답만 측정하기 때문에 추세분석을 통한 관리기준 상회여부만 판단하는 수준으로 운영되어 정량적인 구조물의 상태평가는 불가능한 실정이다. 교량의 내하력과 같이 구조물의 상태와 수명을 평가하기 위하여 응답계측에 따른 입력하중의 정밀도는 매우 중요한 요소라고 할 수 있다.

* 중신회원 · 교신저자 · (주)카이센 대표이사, 명지대학교 토목환경공학과 박사과정 (Corresponding Author · Kaisen, Inc · kai@kaisen.co.kr)

** 중신회원 · 명지대학교 하이브리드구조실험센터 기술본부장, 공학박사 (MyongJI University · jwhan@mju.ac.kr)

*** 중신회원 · 명지대학교 토목환경공학과 정교수, 공학박사 (MyongJI University · cykim@mju.ac.kr)

**** 중신회원 · 명지대학교 토목환경공학과 특임교수, 공학박사 (MyongJI University · pys@mju.ac.kr)

Received May 31, 2019/ revised July 16, 2019/ accepted July 22, 2019

하중 측정시스템 관련하여 다양한 선행연구가 존재하나 주로 중차량 단속용을 대상으로 연구가 진행되었다. Lee et al.(2017), Lee(2004), Choi et al.(2007a)는 하중 측정장치를 개발하였으나 중·저속용으로 고속측정이 불가능하며, Park et al.(2010) 등 포스트텐션 콘크리트포장의 고속 축 중계센서 설치구간 적용을 위한 현장실험을 수행하였으나 축 중량센서 자체를 개발한 것은 아니다. Choi et al.(2007b) 중소기업 센서개발 과제에서는 센서시스템 개발과 함께 WIM 시스템에 대한 종류 및 장단점에 대하여 기술하였다. 또한 Lydon et al.(2017)은 bridge-WIM을 개발하여 교량에 광섬유 센서를 부착하여 응답분석을 통한 하중을 추정하는 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 도로교에서 장기계측시스템을 활용함에 있어 내하력 평가에 중요한 요소인 입력하중을 측정하기 위한 FBG (Fiber Bragg Grating) 광섬유센서 기반의 하중 측정시스템을 개발하였으며, 실내실험을 통하여 그 타당성을 실험적으로 검증하였다.

2. 본론

2.1 센서의 설계

도로에 일반적으로 설치되는 WIM 센서는 일반적으로 벤딩플레이트(bending plate) 방식, 로드셀(load cell) 방식 및 Quartz 방식이 있고, 주로 중차량 단속용으로 많이 사용되고 있다. 벤딩플레이트 방식은 스트레인게이지 또는 압전센서와 같은 센서 부착방식으로 써 정밀도가 높지 않은 것이고, 로드셀 방식은 벤딩플레이트 방식보다는 높은 편이나 차량이 로드셀과 일정거리 이상 떨어진 위치를 통과하면 측정오차가 더 커지는 단점이 있다. Quartz 방식은 다른

방식에 비해 포장체의 커팅폭이 작아 설치가 매우 편리한 장점이 있으나, 매우 고가이고 내구성이 상대적으로 약한 단점이 있다. 이러한 WIM센서는 전기식 기반의 센서로 구성되어 있기 때문에 교량의 장기계측시스템의 입력하중을 파악하기 위한 용도로는 일반적으로 사용되지 않고 있다. 그러나 FBG 광섬유센서는 멀티플렉싱(multiplexing)이 가능하기 때문에 응답과 동시에 입력하중을 하나의 시스템으로 구성할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 광섬유센서 기반의 입력하중 측정장치를 개발하기 위하여 다양한 형상 및 방식에 대해서 해석적 검토를 수행하였다. 입력하중 측정센서의 방식에 대한 검토는 Fig. 1에서 보는바와 같이 가장 일반적인 벤딩플레이트 형상과 양단 로드셀로 하중이 전달되는 벤딩플레이트-로드셀 방식(Fig. 1(a))으로 검토하였으나 도로 커팅면적이 가장 큰 단점이 있다. 커팅폭을 최소화하기 위하여 단순보-로드셀 방식(Fig. 1(b))으로 해석적 검토를 수행하였으나, 실제 중차량 하중에 견디기 위해서는 단순보와 로드셀 구조체가 커지는 단점이 있었다. 따라서 도로 커팅폭을 가장 최소화 하면서도 입력하중이 분배되어 구조체를 좀 더 경량화 할 수 있는 구조인 멀티센서 방식(Fig. 1(c))으로 채택하였으며, 차량 율하중에 해당하는 100 kN에 견디도록 구조체를 설계하였다.

2.2 센서 요소부재 선형성 검증 실험

본 연구는 도로교의 특성상 입력하중 측정장치는 센서 요소부재가 여러 개 설치되어 전체 구조체를 구성하기 때문에 개별 요소부재의 선형적 응답특성이 매우 중요한 요소이다. 따라서 1차적으로 개별 센서 요소부재의 선형성 검증실험을 Fig 2와 같이 실시하였다. 센서 요소부재에 직접하중을 0 ~ 50 kN까지 일정하중을 증가

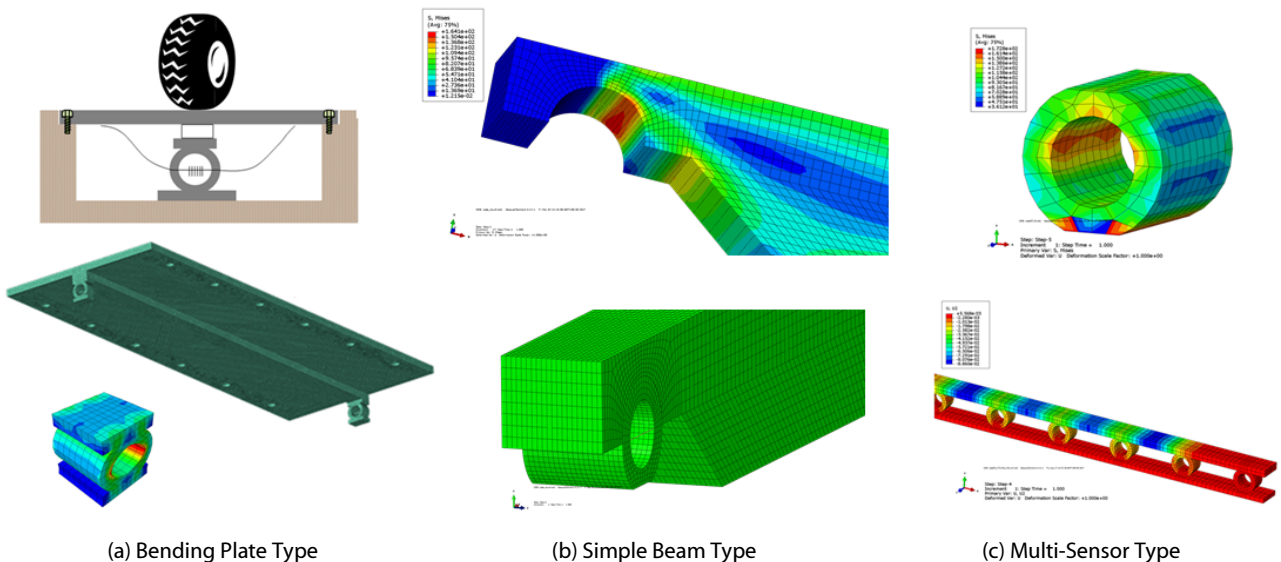


Fig. 1. Load Measurement System

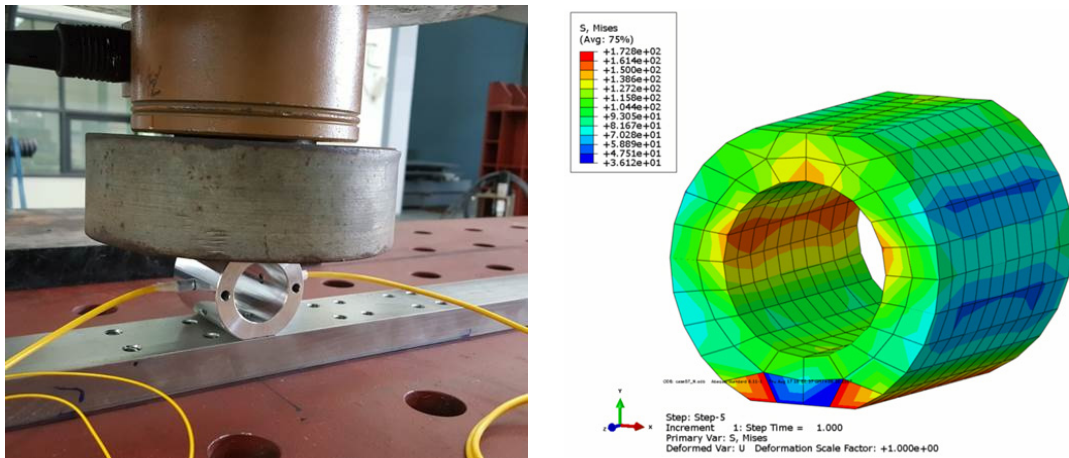


Fig. 2. Linear Test of Sensor Element

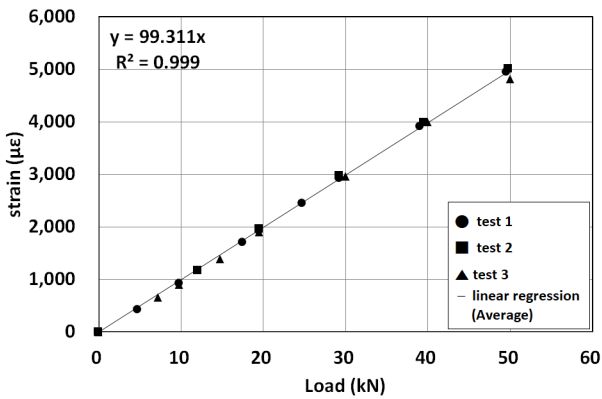


Fig. 3. Linear Test Result of Sensor Element (Primary Ring Loadcell Result)

시켰고, 3회 반복실험을 수행하였다. 하중-응답 측정된 결과는 Fig 3과 같고, 반복실험에 대한 평균 선형상관계수(R^2) 분석결과 0.999로

평가되어 센서 요소부재의 선형성을 실험적으로 검증하였다.

2.3 멀티센서 최적안 선정 및 구조체의 응답특성 실험

2.3.1 멀티센서 최적안 선정

멀티센서의 중요포인트로 센서 간격의 사전검토가 필요하였으며 이를 위해 FEM 해석을 수행하였다. 하중으로는 중차량을 대상으로 하되 도로교설계기준의 활하중 편에 언급된 표준트럭하중의 (100 kN) 접지면을 고려한 폭과 길이인(2.5:1) 약 580×230 mm를 접지면으로 적용하였다. Fig. 4와 같이 다양한 센서간격 별 멀티센서 구조체에 폭 580 mm의 접지면을 5개소 이상의 위치에 재하하였으며 하중위치별 오차율을 정리하여 Table 1에 정리하여 나타내었다. Table 중에서 음영으로 나타낸 것처럼 최대오차율 0.5 % 이내는 충분한 정확도로 판단하였고 이 결과 중 가장 간격이 큰 140 mm를 최적안으로 선정하였다.

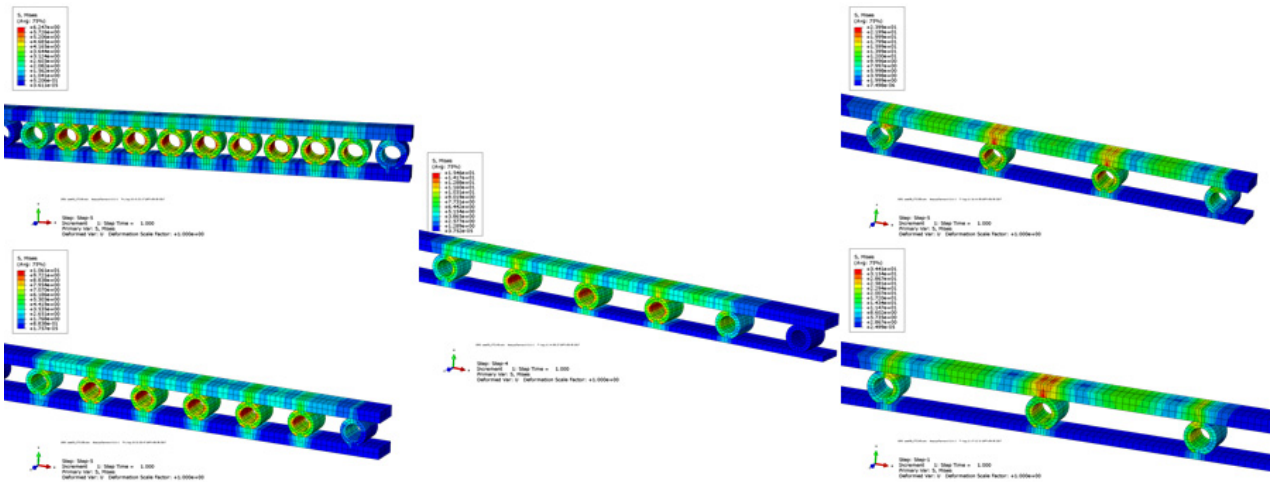


Fig. 4. FEM Analysis Result of Sensor Interval

Table 1. FEM Analysis Error Rate Result by Sensor Interval

Case	Sensor interval (mm)	Strain Sum ($\mu\epsilon$)	Maximum error rate by load position (%)	Total number of sensors (Within 1.5 m)	Minimum number of sensors in load size
1	60	2,500	0.10	25	9
2	80	2,560	0.16	19	7
3	100	2,600	0.27	15	5
4	120	2,590	0.34	13	4
5	140	2,625	0.33	11	4
6	160	2,654	1.04	10	3
7	180	2,715	0.96	9	3
8	200	2,752	0.61	8	2
9	240	2,781	2.35	7	2

2.3.2 멀티센서 구조체의 응답특성 실험

최적안으로 선정된 멀티센서 구조체의 성능검증을 위하여 Fig. 5와 같이 총 7개의 요소부재로 구성되어 실험검증을 수행하였다. 실험은 재하하중 20 kN을 재하위치(P1, P2, P3, P4)를 변경하면서 각각 가력하였다. 각 센서 요소부재는 S1 ~ S7으로 구분하였으며, 각 위치의 센서는 보정(calibration) 후 각기 다른 횡방향 환산계수를 적용하였다. 오차율 분석은 S1 ~ S7 센서의 응답을 모두 합산한 후, P1 위치에서의 결과를 기준으로 상대적인 오차율을 계산하여 Table 2에 나타내었다.

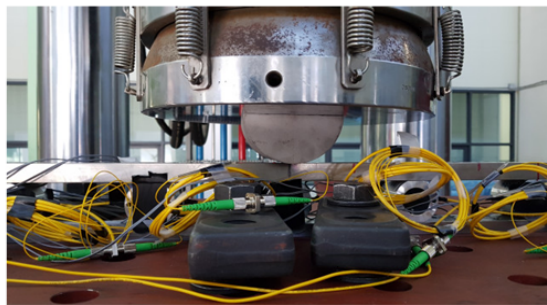
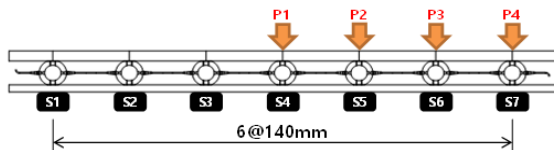


Fig. 5. Verification Test of Multi-Sensor Type

Table 2. Test Results of Multi-Sensor Type

Load position	Sensor strain ($\mu\epsilon$)								error rate (%)
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	total	
P1	-1	-36	139	1,913	169	-29	-2	2,154	0.00
P2	-1	1	-51	172	1,925	145	-39	2,151	-0.10
P3	0	1	2	-53	163	1,885	137	2,136	-0.81
P4	-1	-1	1	-2	-42	101	2,093	2,150	-0.18

분석결과 하중위치가 달라진다 하더라도 횡방향 환산계수를 적용하면, 각 센서의 변형률 총합에 대한 최대 오차율은 0.81 % 미만으로 산정되었으며, 이를 기준으로 하중을 추정하면 하중위치가 달라진다 하더라도 유사한 하중 추정이 가능할 것으로 판단된다.

2.4 포장체에 매설된 입력하중 측정장치의 성능검증

2.4.1 실험체 제작

도로교의 특성을 고려하여 콘크리트 포장체에 매설된 입력하중 측정장치를 모사하기 위하여 콘크리트 블록에 홈을 설치한 후 콘크리트를 타설하였다. 기 설치된 홈에 센서를 배치한 후 무수축 몰탈로 충전하였으며, 일정한 하중이 가력되도록 상면의 평탄도를 조정하였다. 실험용 콘크리트 블록은 길이 2,400 mm, 폭 800 mm, 높이 400 mm이며 콘크리트 설계강도는 24 MPa로 제작하였다(Fig. 6).

2.4.2 센서 요소부재 보정

입력하중 측정장치는 콘크리트 블록에 매설하기 전에 각각의 센서 요소부재에 대하여 보정을 실시하여 환산계수를 산정하였다. 각 센서 요소부재의 실험결과는 Fig. 7과 같고, 각 위치별 환산계수는 Table 3과 같이 신뢰도 있게 보정하였다.

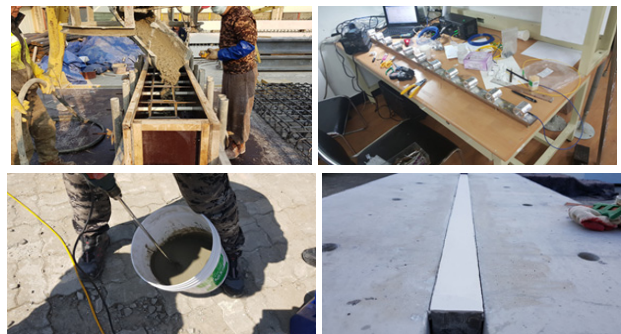


Fig. 6. Installation of Multi-Sensor Type Load Measurement System

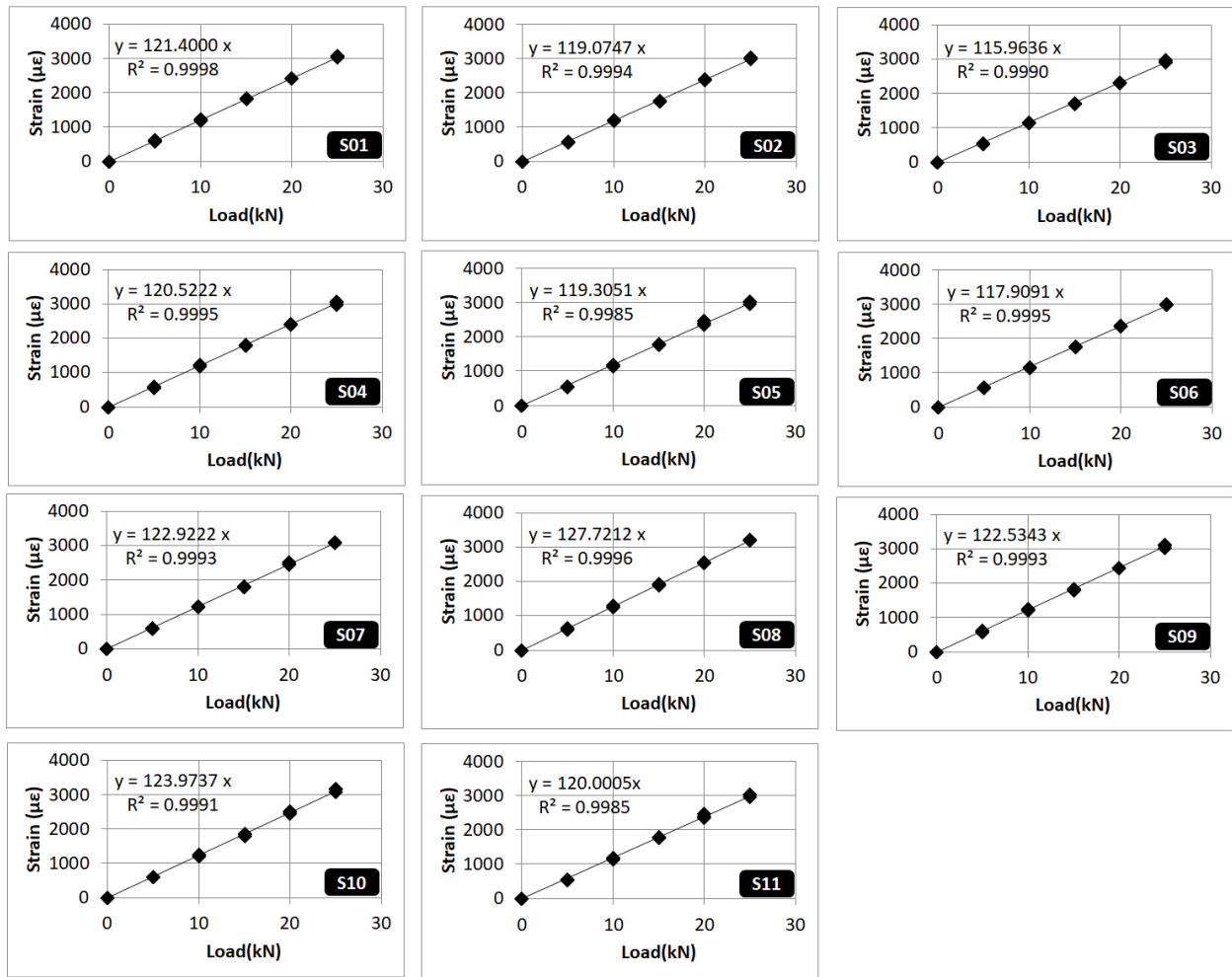


Fig. 7. Calibration Results (3rd Ring Loadcell Result)

Table 3. Calibration Factor of Each Sensor Elements

Division	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11
Calibration factor	1.00	1.02	1.04	1.00	1.01	1.03	0.98	0.95	0.99	0.98	1.01
R ²	0.9998	0.9994	0.9990	0.9995	0.9985	0.9995	0.9993	0.9996	0.9993	0.9991	0.9985

2.4.3 실험절차

실험셋팅은 포장체를 모사하기 위하여 Fig. 8과 같이 UTM 베이스블럭에 앵커로 완전 고정 설치하였으며, 운하중을 모사하기 위하여 580×230 mm 크기의 가력판을 이용하여 하중을 가력 하였다. 실험은 UTM을 사용하여 하중을 0 ~ 100 kN까지 20 kN 단위로 순차적으로 증가하면서 5회 반복실험을 하였다. 하중가력은 Fig. 9와 같이 위치를 4단계(P1, P2, P3, P4)로 변경하면서 응답을 측정하였다.



Fig. 8. Test Set-Up

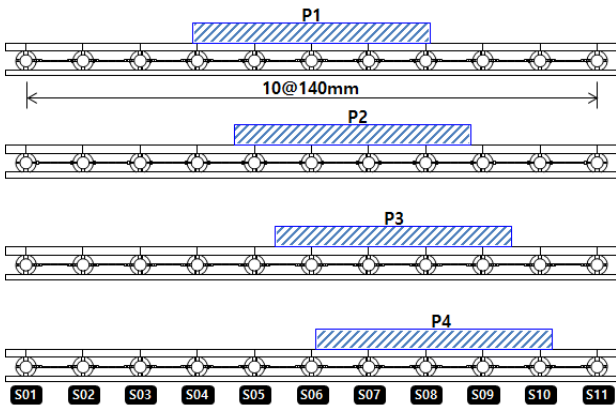


Fig. 9. Load Case

2.4.4 실험 결과

단계별 재하하중에서 최대하중 100 kN일 때 각 센서 위치별 응답에 대한 결과는 Fig. 10과 같이 계속되었다. 각 위치별 5회 재하시 평균값 대비 응답의 재현성 오차는 P1는 -0.12 ~ 0.09 %, P2는 -0.08 ~ 0.05 %, P3는 -0.03 ~ 0.04 %, P4는 -0.06 ~ 0.06 %로 매우 뛰어난 응답의 재현성을 확인할 수 있었다. 재하하중 증가에 따른 각 재하위치별 응답결과는 Fig. 11과 같이 평가되었다. 재하하중에 따른 선형성에 대한 상관계수(R^2)

분석결과 P1은 0.9955, P2는 0.9953, P3는 0.997, P4는 0.9965로 평가되어 포장체에 매설시에도 입력하중에 대한 선형신뢰성을 실험적으로 검증하였다.

또한, 각 하중단계별 응답의 합을 구한 후 평균값을 기준으로 하중위치별 오차를 산정하여 나타내면 Table 4와 같다. 각 하중단계별 응답에 대한 최대 오차는 재하하중이 20 kN일 때는 2.22 %, 40 kN일 때는 -1.35 %, 60 kN일 때는 -0.78 %, 80 kN일 때는 -0.52 % 그리고 100 kN일 때는 -0.49 %로 평가되어 하중단계별 응답에 오차는 작게 발생하였다. 또한, 재하하중이 작을 때보다 클 때 응답오차가 점차 감소함을 확인할 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 도로교 장기계측시스템의 입력하중 측정시스템 개발을 위하여 센서 요소부재 선형성 검증실험, 멀티센서 구조체 응답실험 및 포장체에 매설시 입력하중 측정장치 성능실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구의 입력하중 측정장치에 사용하는 개별 센서 요소부재의 선형성 검증 실험결과 선형 상관계수(R^2)는 0.999로 센서 요소부재의 선형성을 실험적으로 검증하였다.

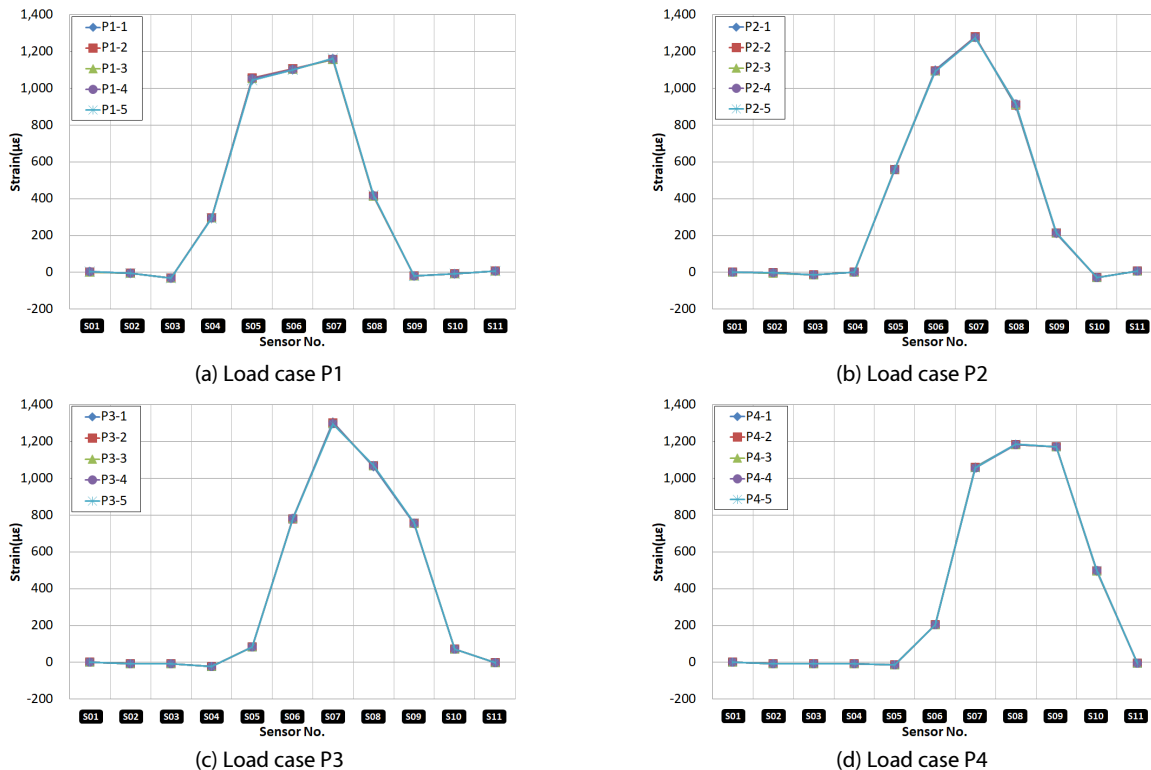


Fig. 10. Test Results (100 kN)

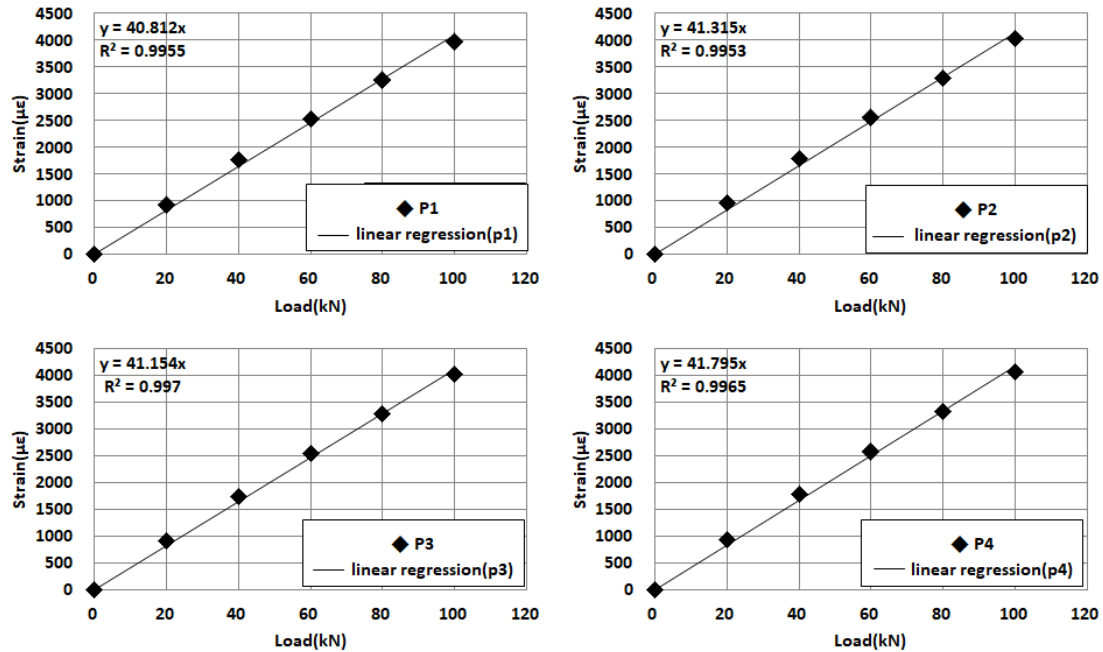


Fig. 11. Response Linear Curve of Load Steps

Table 4. Error Rates

Load position	20 kN	40 kN	60 kN	80 kN	100 kN
P1	-0.12	0.44	0.15	0.09	0.04
P2	2.22	1.06	0.56	0.33	0.38
P3	-1.41	-1.35	-0.78	-0.52	-0.49
P4	-0.70	-0.15	0.06	0.10	0.07

- (2) 일정간격으로 7개 개별센서를 사용한 멀티센서 구조체의 선형성 응답검증을 실험한 결과, 횡방향 환산계수를 적용하여 각 센서의 변형률 총합의 최대 오차율은 0.81 % 미만으로 평가되었다.
- (3) 도로교의 콘크리트 포장체에 매설된 입력하중 측정장치를 모사하기 위하여 일정간격으로 11개의 개별센서를 사용한 실험체를 제작하여 검증실험을 수행하였다. 실험결과 하중크기 및 재하 위치가 달라진다 하더라도, 하중단계별 선형성에 대한 신뢰도 (R²)가 최소 0.9953으로 높게 평가되었고, 최대응답 오차도 2.2 % 미만으로 응답의 재현성을 확인할 수 있었다.
- (4) 도로교에서 FBG 기반의 입력하중 측정장치를 적용하면 차량 통행에 따른 입력하중과 응답을 측정하여 신뢰도 기반의 교량의 정량적인 상태평가에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 국토교통부 건설기술연구개발사업의 연구비 지원 (18SCIP-B128487-02)의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Choi, J. D., Lho, B. C., Eom, J. S. and Kim, J. W. (2007a). "Application of low and medium speed weigh-in-motion measurements." *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, KSCE, Vol. 2007, No. 10, pp. 4044-4047 (in Korean).

Choi, J. S. et al. (2007b). *Development of in-pavement fbg sensor system for traffic monitoring. Technology Innovation Development Project of SMTECH.*

Lee, C. M., Choi, Y. H. and Kim, E. J. (2017). "A study on the development of overload detecting pad for low speed WIM system." *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, KSPE, Vol. 34, No. 3, pp. 179-184 (in Korean).

Lee, H. J. (2004). "Low speed weigh-in motion system using multi-FBG sensors." *J. Institute of Electronics Engineers of Korea, IEIE*, Vol. 41, No. 1, pp. 21-28 (in Korean).

Lydon M., Taylor, S. E., Doherty, C., Robinson, D., O'Brien, E. J. and Žnidarič, A. (2017). "Bridge weigh-in-motion using fibre optic sensors." *Proc. of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering*, Vol. 170, No. 3, pp. 219-231.

Park, H. B., Kim, S. M., Yun, D. J. and Kim, D. H. (2010). "Field experiment of post-tensioned prestressed concrete pavement for weigh-in-motion sensor installed section." *Proc. of the KCI Conf.*, KCI, pp. 15-16 (in Korean).