

논문 2004-41SD-1-4

다중 광섬유 브래그 격자 센서를 적용한 저속용 자동계중 시스템

(Low Speed Weigh-In Motion System Using Multi-FBG Sensors)

이 호 준*

(Hojoon Lee)

요 약

본 논문에서는 전기 잡음과 장기 계측이 어려운 스트레인 게이지 센서의 단점을 보완하기 위하여 FBG 광섬유 센서를 사용하여 저속용 측정기를 개발하였고 현장에 측정 시스템에 적용하여 실험하였다. 각기 다른 브래그 파장을 갖는 FBG 센서로부터 반사되는 파장 변화를 이 센서들과 동일한 FBG 필터들을 사용하여 빛의 강도로 변화시켜 차량의 무게를 측정하였다. 광원의 광전력과 온도 변화를 보상을 하였으며 잡음의 영향을 감소시키기위해 위해 lock-in 증폭기를 사용하였다. 모의 실험을 통해서 차량의 하중인가 위치에 관계없이 동일하게 측정이 측정되는 구조의 설계가 가능하였다. 현장 실험을 통하여 실제 차량 측정 측정에 대한 선형성과 재현성을 확인하였다.

Abstract

We have demonstrated a low speed weigh-in motion system using FBG sensors and performed field test at a trial road. Technique, called identical chirped grating interrogation, have used for a demodulation relying on the mismatching of two identical broadband chirped gratings. We compensated the fluctuation of LED power and the temperature of sensor and used a lock-in amplifier to reduce effect of noise. We could design a bending plate that the measurement results are independent of position of weight. The FBG sensors weigh-in motion system showed linearity and reproducibility.

Keywords: Fiber Bragg grating, optical fiber sensors, FBG sensor, sensor signal processing, weigh-in motion

I. 서 론

도로에 진입하는 차량의 하중을 측정함으로써 과적으로 인한 도로의 손상을 방지하기 위하여 WIM (weigh-in motion)이 사용된다. WIM 시스템은 고속 주행시 측정을 측정하는 고속용 WIM과 저속용 WIM으로 분류되며 고속 WIM으로 압전센서가 많이 사용하며 저속용 WIM은 스트레인 게이지(strain gauge)센서를 측정판(bending plate)에 부착하여 많이 사용한다. 기존에 사용되고 있는 저속용 측정 시스템은 측정판내에 여러개의 스트레인 게이지가 직렬로 연결되어 1개

의 저항군을 형성하여 4개의 저항군으로 휘스톤 브리지(Wheatstone bridge)를 이루고 있다. 측정판 위를 차량이 통과하면 차량 하중에 의하여 측정판이 휘게되며 스트레인 게이지의 길이 증가는 저항 증가로 나타나게 된다. 두개의 저항군은 하중을 받지 않으며 나머지 두개의 저항군이 하중에 의해 변화되도록 설계되어 있다. 이것으로 구성된 휘스톤 브리지에서 하중변화가 수 mV 정도의 매우 작은 전압 변화로 변환되기 때문에 이 신호를 증폭하여 측정을 결정한다. 스트레인 게이지 센서를 사용하여 시스템을 구성하였을 경우 차량 등으로부터 발생하는 전자기장 간섭과 잡음 등에 의한 영향을 받아 계중 오차가 발생하며 온도에도 민감한 특성을 가지고 있다.

현재 많이 사용되고 있는 piezoelectric 센서는 압력과 같은 응력을 가하여 어떤 방향의 변형을 일으키게 하면

* 정희원, 호서대학교 전기 정보통신공학부
(Optical Communication Lab., Dept. of Information Communication Eng., Hoseo Univ.)
접수일자 : 2003년8월21일, 수정완료일 : 2004년1월2일

유전 분극(polarization) 현상이 일어나게 되고 전하량이 변형의 양에 비례하는 현상을 이용한다. 이러한 방법은 재현성 실험에서는 좋은 결과를 얻었으나, 단점으로는 계절변화 및 밤낮의 변화에 의한 온도변화에 따라 측정 신호가 변화하며 물리적으로 손상되기 쉽다는 점이다. 현장 실험을 통해 센서 온도가 증가함에 따라 신호대 잡음비, 부하 측정 정밀도와 감도 변화에 대한 연구가 보고되었다^[1]. 고속용 WIM에 사용중인 감지센서는 이 방식이 주류를 이루고 있으나 정확도가 떨어지고 센서의 수명이 짧아 대체 개발이 요구되고 있다.

또한 광섬유 센서가 물리적 량을 정밀하게 측정하고 센서 신호 전송시에 손실이 작고 전기자기장의 영향을 받지 않으며 부피가 작은 등의 장점을 가지고 있기 때문에 많은 연구가 이루어 졌다^{[2]-[3]}. 이러한 광섬유 센서를 WIM에 사용하기 위하여 수정된 Michelson 간섭 광섬유센서가 연구되었으나, 간섭센서는 편광 의한 fading 현상이 발생하기 때문에 센서에 작용하는 힘을 압력으로 변환하여 간접적으로 측정하여야 한다^[4]. 본 연구에서는 FBG(fiber Bragg grating)를 사용하여 WIM 시스템을 개발하였다. FBG는 현재 광통신 소자로도 많이 사용되며, 스트레인, 온도, 진동 등의 물리량 변화에 민감하고 장기 계측에 적합하므로 연구가 활발하게 진행되고 있는 광소자이다^{[5]-[6]}. FBG에 인가되는 스트레인의 변화는 브래그(Bragg) 파장을 변화시키고 이를 측정함으로써 인가된 스트레인을 측정할 수 있으며, 단선의 광섬유 내에 FBG를 직렬로 연결하여 파장 분할함으로써 센서를 다중화할 수 있고 크기가 작으므로 구조물 내에 삽입하여 여러 지점의 변형을 감지할 수 있다^[7]. 이러한 특징을 갖는 FBG 광섬유 센서를 평면의 축중판에 부착한 후 차량의 하중 변화에 따른 FBG의 브래그 파장의 변화를 측정하였다. 그리고 동일 브래그 파장을 갖는 FBG 광섬유 센서를 필터로 사용하여 FBG 브래그 파장 변화를 광 강도 변화로 변환시켰으며^{[8]-[9]}, 센서와 필터를 동일한 온도 조건하에 두어 온도의 영향이 보상될 수 있도록 시스템을 설계하였다. 또한 두 개의 수신기와 나눗셈기를 사용하여 광원으로 사용된 LED 광 파워 변화에 대한 영향을 보상하였다. 축중판의 실험실 모델을 개발하여 설계한 후에 현장모델을 제작하였고 시험 도로에서 WIM시스템에 대한 현장 실험을 하였다.

II. 저속용 WIM 시스템의 구성

자동 계중 시스템의 블록도는 그림 1과 같다. 잡음의 영향을 감소시키기 위하여 정현파 신호로 LED를 변조하고, 변조된 빛은 3-dB 결합기 1을 통과하여 FBG 센서에서 반사되어 결합기 2로 입사된다. 이 신호는 3-dB 결합기 2에서 둘로 분리되어 한 신호는 FBG 필터를 통과하여 PD (photodiode) 1에서 수신되고 다른 가지로 나오는 신호는 PD 2에서 각각 수신된다. 여기서 사용된 FBG 필터는 FBG 센서들과 같은 갯수이며 FBG 센서에 스트레인이 인가되기 전에 파장 특성과 같은 특성을 갖는다. 스트레인이 인가되지 않았을때 FBG 센서에서 반사된 신호가 FBG 필터에서 모두 반사되기 때문에 PD 1에서 수신되는 광 전력은 없다. 그러나 스트레인이 인가 되었을때 FBG 센서에서 반사되

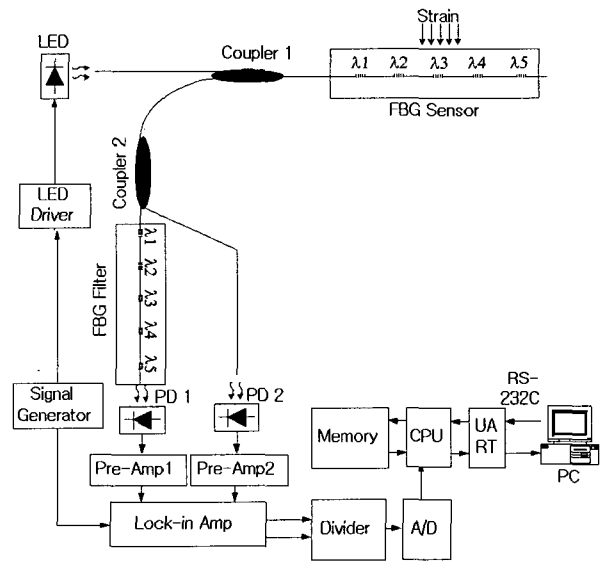


그림 1. 저속용 WIM 시스템의 블록도

Fig. 1. Experimental schematics of low speed WIM.

는 신호의 브래그 파장이 변화되기 때문에 FBG 필터를 통과하는 광 신호가 발생되며 스트레인의 양에 비례하는 광전력을 PD 1에서 수신할 수 있다. 그러나 스트레인에 의한 브래그 파장 이동이 필터의 대역폭 보다 크게되면 광전력은 더 이상 증가하지 않는다. FBG 필터를 통과하지 않는 광 결합기의 다른 쪽에서는 FBG 필터를 통과하지 않고 PD2에 수신된다. FBG에서 반사되는 수신 신호가 미약하기 때문에 lock-in 증폭기를 사용하여 신호를 검출하였다. 그림 2(a)-1은 LED 변조 신호를 나타내며 2(a)-2는 FBG 센서에서 반사된 온 신호를 나타낸다. 그

리고 2(b)-1은 곱셈기 출력의 출력파형을 나타내며 그림 2(b)-2은 lock-in 증폭기내의 적분기 출력신호이다.

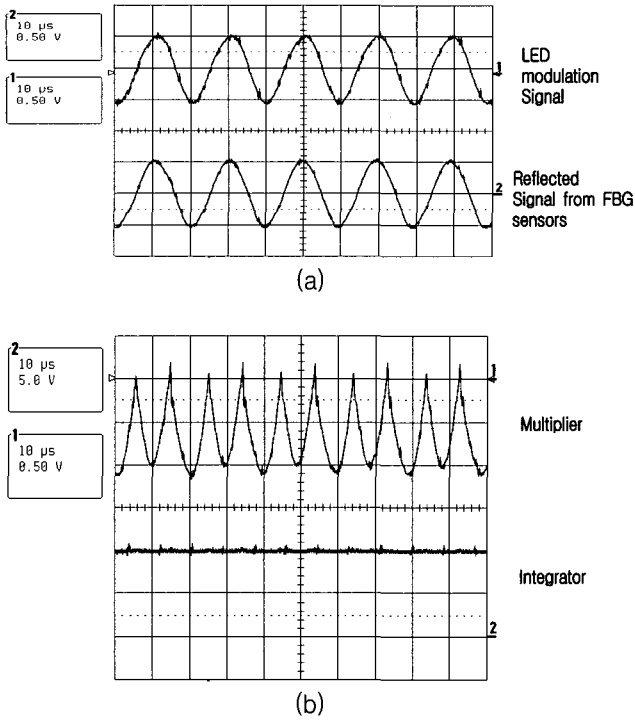


그림 2. (a) LED 변조신호와 FBG 센서 반사신호
 (b) 곱셈기 출력 신호와 적분기 출력 신호
 Fig. 2. (a) LED modulation signal and reflected signal from FBG sensors
 (b) multiplier and integrator output signal

PD 1과 2에서 수신된 신호는 나뉜셈기에서 PD1/PD2의 연산을 하며 여기서 나뉜셈 연산은 LED의 광 전력 변화를 보상하여 FBG 센서에서 반사된 빛의 파장의 천이에 따른 광 전력 변화만을 측정하기 위하여 수행된다. 나뉜셈기의 출력 신호는 A/D 변환기를 통해 CPU로 전달되며 CPU는 신호의 신호 파형의 깊이를 검출한다. 이때 저속용 WIM은 고속용 WIM과 달리 저속으로 진행되는 차량에 대한 측정을 정확히 그리고 비교적 오랜 시간 동안 측정하기 때문에 보다 정밀도를 높이기 위해 차량이 점유하는 시간 동안 수 회 측정된 측정 데이터의 평균값을 구해 측정으로 결정한다. 그리고 다음 측이 입력될 때까지 대기하고 일정시간 다음 측의 하중이 인가되지 않을 때에 처리되어진 측정데이터를 PC로 전송하여 차량의 정보를 모니터에 표시한다. 또한 FBG의 브라그 파장은 온도에 따라 변화하기 때문에 온도에 따

른 보상이 필요하다. 본 연구에서는 센서와 필터로 사용된 FBG를 동일한 온도 환경에 두어 온도에 의한 영향을 제거하였다.

III. 저속용 WIM 시스템의 실험 및 고찰

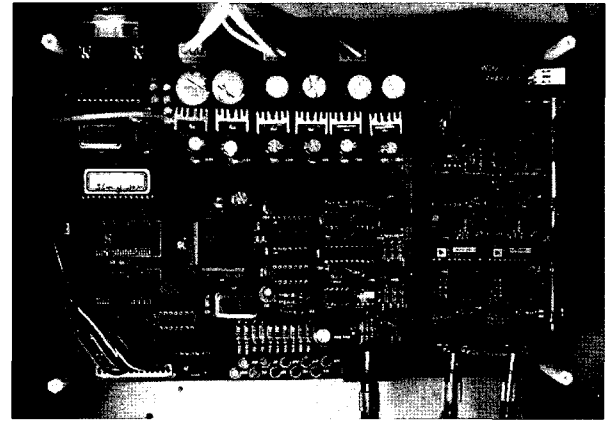
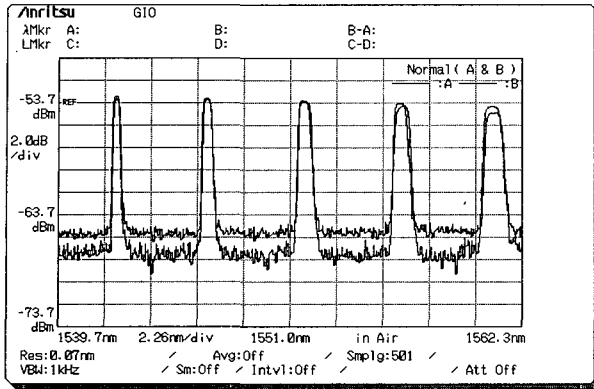


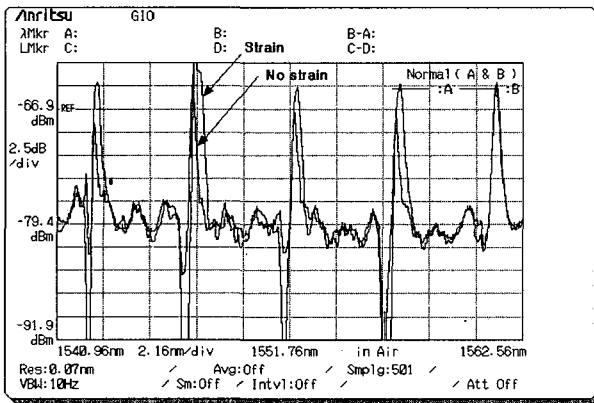
그림 3. 신호처리 보드 사진
 Fig. 3. Photograph of sensor signal processing board.

실험을 위해 제작된 보드의 사진은 그림 3과 같다. 스펙트럼 선평이 0.8 nm 이고 97.5 %의 반사율을 갖는 다섯개의 FBG 센서를 직렬로 연결하였으며, 동일한 특성의 FBG를 필터로 사용하였다. 그림 4(a)는 센서와 필터의 스펙트럼을 나타낸 것으로 센서와 필터의 스펙트럼을 정확하게 일치하는 것을 볼 수 있다. 그리고 접속에 따른 접속 손실을 제거하기 위해 접속없이 하나의 광면감성 광섬유에 일정 간격으로 5개의 FBG 센서를 제작하였다. 그림 4(b)는 FBG 센서에서 반사된 신호가 동일한 특성을 갖는 FBG 투과필터를 통과한 스펙트럼이다. 스트레인이 인가되지 않은 경우 FBG 센서에서 반사되어 온 신호의 대부분은 FBG 필터에서 제거된다. 그러나 스트레인이 인가되었을 때 센서의 브라그 파장은 장파장 쪽으로 이동하게 되고 필터를 통과하는 빛이 증가하게 된다. 그림 4(b)에서 하중이 가해졌을 때와 가해지지 않았을 때 스펙트럼의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 필터링 되어진 광전력의 변화를 측정하여 측정값을 얻게 된다.

센서가 부착된 측정판의 구조 또한 차량의 하중 측정에 중요한 역할을 한다. 측정판 위에 차량 하중이 가해지는 위치에 무관하게 그 측정이 동일하게 측정되도록 측정판이 설계되어야 한다. 그림 5는 차량 하중의 위치



(a)



(b)

그림 4. (a) FBG 센서와 필터의 반사 스펙트럼
 (b) 필터를 통과한 FBG 반사 파장 스펙트럼
 Fig. 4. (a) Reflection spectra of FBGs for sensors and filters.
 (b) Spectra of FBG sensor signal filtered by FBG filters.

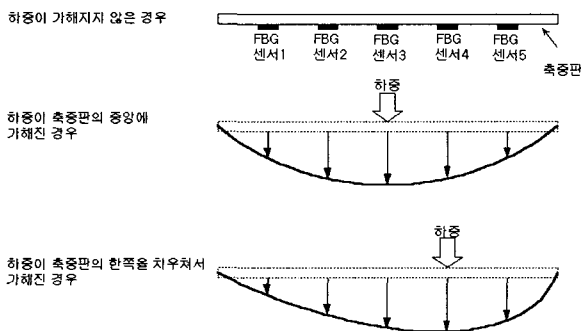
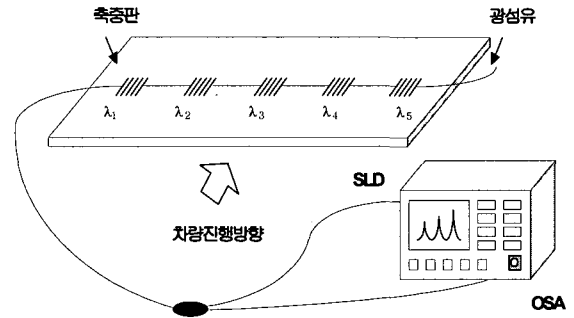
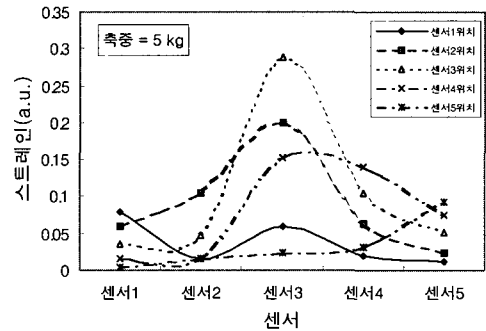


그림 5. 저속 WIM 센서의 축중판내의 스트레인 분포
 Fig. 5. Strain distribution applied to bending plate of low speed WIM.

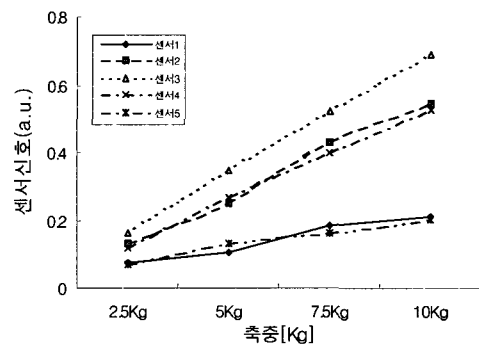
에 따른 스트레인 인가되는 모양을 나타내며 축중판에 차량의 하중이 가해졌을 때 하중의 합이 같아야 한다. 본 연구에서는 기존의 스트레인 게이지 센서에서 사용



(a)



(b)



(c)

그림 6. (a) 차량의 진행방향과 센서가 수직인 축중판
 (b) 축중인가 위치에 따른 각센서에서 측정된 스트레인
 (c) 축중인가 위치에 따른 축중에 대한 센서신호
 Fig. 6. (a) FBG sensor array perpendicular to vehicle progress direction
 (b) Measured strain at each sensors as a function of position of weight
 (c) Sensor signal vs. weight as a function of position of weight

되고 있는 저속용 축중판의 1/4 크기로 시험 모델을 제작하여 하중 위치 의존성 실험을 하였다. 첫 번째 실험은 그림 6(a)와 같이 센서를 일렬로 차량이 진행하는 방향과 수직으로 연결하여서 축중에 따른 하중 분포를 측정했다. 이렇게 FBG 센서를 배열하여 5 kg의 축중을 인가하였을 때 각 센서에서 측정된 스트레인은 그림 6(b)와 같으며 대체로 축중판의 중앙에 있는 센서에서 스트레인이 크게 측정되었으나 각 센서에서 측정된 스트레인의 합이 축중인가 위치가 변함에 따라 동일하지 않았다. 그림 6(c)는 하중을 2.5-10 kg 변화시켰을 때 각센서에서 측정된 센서 전압을 나타낸다. 이 축중판의 가운데 즉 센서 3의 위치에 축중이 인가되었을때 각 센서에서 측정되는 센서 전압이 가장 큰 값을 갖는 것이 측정되었고 센서 2와 4의 위치에서는 센서 전압이 다음으로 크게 측정되었고 거의 같은 특성을 보이고 있다. 그리고 센서 1과 5의 위치는 가장 센서 전압이 가장 작았으며 또한 동일한 특성을 보였다. 그러나 모든 축중인가 위치에서 센서 전압은 축중 증가에 따라 선형적으로 증가함을 보여준다.

이러한 문제를 해결하기 위해 그림 6의 실험에서 차량의 진행 방향과 직각으로 센서를 배열했던 구조를 그림 7(a)와 같이 차량의 진행방향과 나란하도록 센서를 장착하여 실험하였다. 그림 7(b)는 15 kg의 축중을 인가하는 위치에 따라 각 센서에서 측정한 스트레인을 나타낸 그림이다. 축중이 인가된 센서 위치에서 가장 많은 스트레인이 측정되며 각 센서에서 측정되는 스트레인의 합은 축중이 인가되는 위치를 변화시켜도 동일하게 측정되었다. 그림 7(c)에서는 축중을 5-20 kg으로 증가에 시켰을때 센서 전압을 나타내며 축중의 위치에 따라 거의 변화하지 않음을 보여주며 축중이 어떤 센서위에 인가되더라도 축중에 따른 선형성이 유지되는 결과를 얻을 수 있었다.

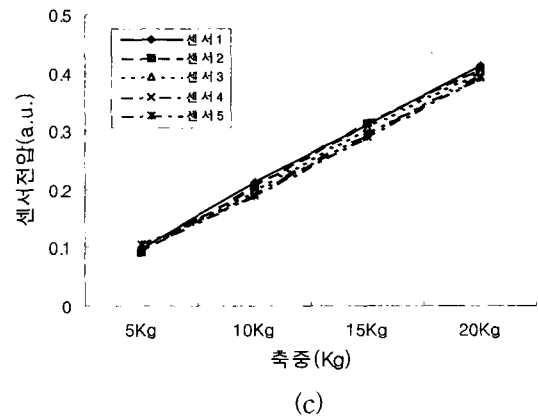
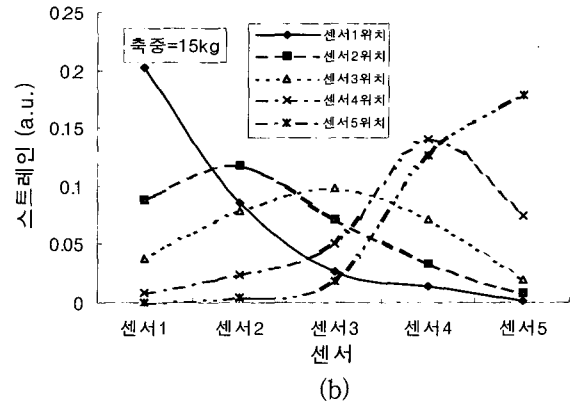
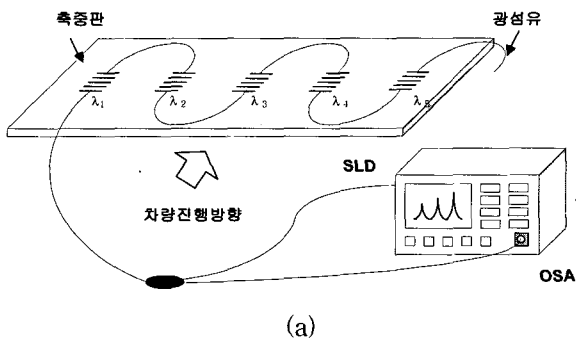


그림 7. (a) 차량의 진행방향과 센서가 수평인 축중판 (b) 축중인가 위치에 따른 각센서에서 측정된 스트레인 (c) 축중인가 위치에 따른 축중에 대한 센서신호
 Fig. 7. (a) FBG sensor array parallel to vehicle (b) Measured strain at each sensors as a function of position of weight (c) Sensor signal vs. weight as a function of position of weight

실험실 모의 실험결과에 의하여 하중이 인가되는 위치에 관계없이 동일한 값의 축중을 측정할 수 있으며, 하중에 따른 센서 시스템의 선형적 특성을 얻을 수 있는 축중판 구조를 고안하였다. 이렇게 개발된 시스템을 현장 시험하기 위하여 실제의 축중판에 FBG 센서를 부착하여 설치하였다. 그림 8은 저속용 WIM에 3축 차량의 하중을 인가 후 나뉜셈기 출력단의 신호를 오실로스코프로 측정 한 것으로써 스트레인이 없는 경우가 초기값이 되며 스트레인을 인가하였을 때의 전압 차이가 하중을 나타낸다. 3축에 의한 하중이 1륜, 2륜 그리고 3륜이 시간차를 가지고 인가되는 것을 볼 수 있으며 하중의 크기에 따라 센서 전압이 낮아 지는 것을 볼 수 있다. 그림 9는 이렇게 신호 처리 되어진 데이터를 RS-232 포트를 사용하여 PC로 전송한 후의 LabView화면을 나타낸다. 이 화면에는 각



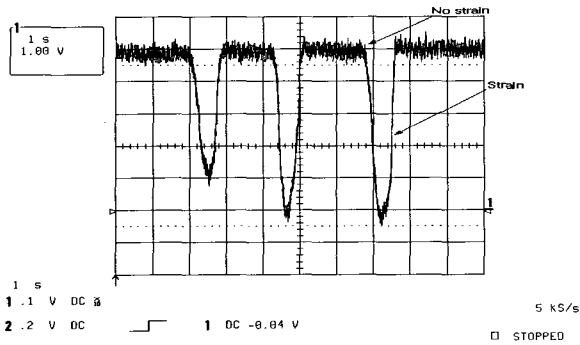


그림 8. 하중 인가시 오실로스코프 파형
 Fig. 8. Oscilloscope waveform when weight applied to FBG sensor.

차축에 따른 축중과 축중을 합한 총중량, 축수, 차량 속도와 축간거리가 표시된다. 축간 거리는 축간 지연시간과 차량 속도로부터 결정된다. 속도는 일정거리 떨어진 축중판 두장을 차례로 밟고 지나갈 때의 지연시간으로부터 측정 가능하다.

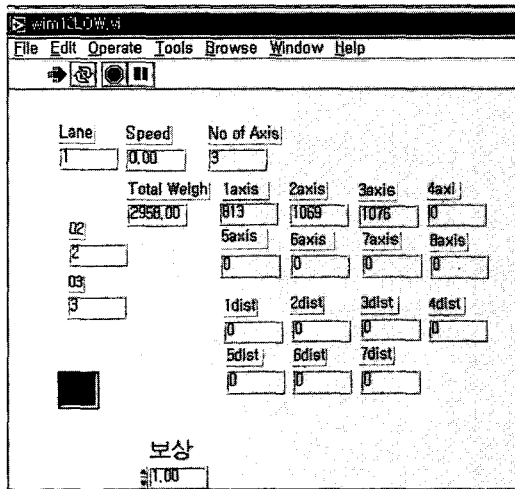


그림 9. 저속용 축중기의 PC 모니터 화면
 Fig. 9. PC display of low speed WIM system.

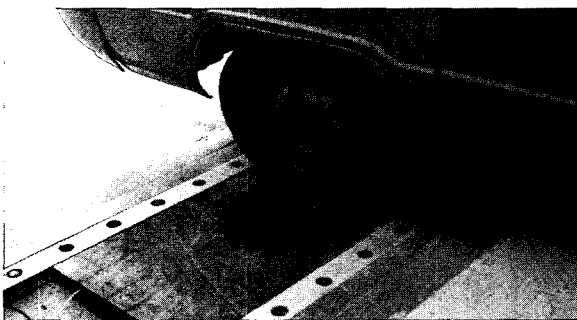


그림 10. 축중판을 통과하는 차량 사진
 Fig. 10. Photograph of vehicle passing the bending plate.

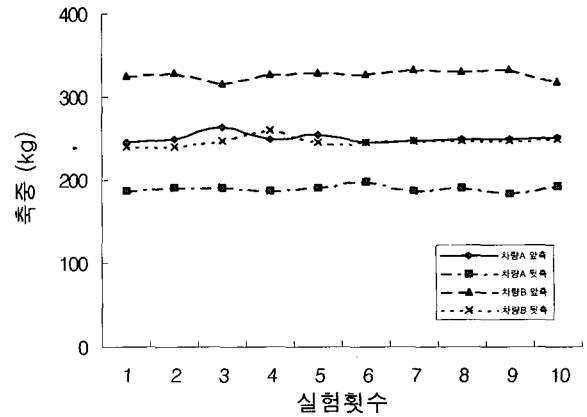


그림 11. 차량 축별 축중의 반복 측정
 Fig. 11. Measured weight data for axes of vehicle.

그림 10은 실제 차량이 축중판을 밟고 지나가는 현장 실험을 하는 사진이다. 차선 한 쪽에 축중판을 설치하였고 축중판 아래에는 5개의 광섬유 센서를 직렬로 장착했으며 축중판으로부터 들어온 스트레인의 변화를 신호처리하게 된다. 이렇게 처리된 신호는 PC로 전송되어 화면에 표시된다. FBG 광센서가 설치되어진 축중판 위로 2축을 가진 차량을 통과시켜 그 결과 측정값의 정확도와 신뢰성을 시험하였다. 차축이 센서위를 통과함에 따라 신호처리 보드의 아날로그부에서 출력되는 신호를 오실로스코프로 관찰하였고 PC 모니터에 나타난 축중을 측정함으로써 정확한 차량의 데이터를 얻을 수 있다. 그림 11은 두 종류의 승용차에 대하여 축중 측정 실험을 한 결과로써 10회씩 반복하여 실험하여 차량 무게에 대한 하중을 측정하였다. 각각의 차량에 대한 표준편차는 약 2% 정도로 축중이 정확히 재현성있게 잘 측정됨을 알 수 있었다.

IV. 결론

본 연구에서는 기존의 스트레인 게이지의 단점을 보완하기 위하여 FBG 광섬유 센서를 사용하여 저속용 축중 시스템을 개발하였고 현장 적용 실험을 하였다. 각각 다른 브래그 파장을 갖는 FBG 센서들로부터 반사되는 브래그 파장 변화를 이 센서들과 동일한 FBG 필터들을 사용하여 광강도로 변화시켜 차량의 무게를 측정하였다. 광원의 광전력과 온도 변화를 보상하였고 그리고 잡음의 영향을 감소시키기 위하여 lock-in 증폭기를 사용하였다. 모의 실험을 위해 기존 축중판의 1/4 크기로 축중판을 제작했으며 이 실험을 통하여 차량이 축중판의 위치에 관계

없이 동일하게 축중이 측정되는 구조의 설계가 가능하였다. 축중판에 FBG 센서를 부착한 후 하중을 인가하여 선형성이 유지되는 것을 확인하였다. 현장 시험시 모의실험에서 얻었던 축중판의 구조와 같게 축중판을 가공하였으며 자체 제작되어진 신호처리보드로 실제 차량의 하중을 측정했다. 반복실험을 통해서 실제 차량 하중 측정에 대한 선형성과 재현성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] A. T. Papagiannakis, E. C. Johnston, S. Alavi, and J. A. Mactutis, "Laboratory and field evaluation of piezoelectric weigh-in motion sensors," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 29, no. 6, pp 535-543, Nov., 2001.
- [2] K. T. V. Grattan and B. T. Meggitt, *Optical Fiber Sensor Technology*, Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [3] Jacob Fraden, *Handbook of Modern Sensors, Physics, Designs, and Applications*, Springer Verlag 2nd Ed, 1997.
- [4] Pave Wierzba, Bogdan B.Kosmowski, Adam Mazikowski, "Interferometric optical fiber sensor for weigh-in-motion of road vehicles", *Proceedings of Lightguides and their applications in SPIE vol. 4239*, pp. 138-144, 2000.
- [5] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, San Diego, CA: Academic, 1999.
- [6] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings, Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*, Artech House, 1999.
- [7] H. Lee, K. Kim, N-Y Choi, et al., "New approach to fiber optic weigh-in motion with multiplexed Bragg grating sensors," *Proc. of 14th international Conf. on Optical Fiber Sensors*, pp. 732-735, 2000.
- [8] R. W. Fallon, L. Zhang, A. Gloag, and I. Bennion, "Identical broadband chirped grating interrogation technique for temperature and strain sensing," *Electronics Letters*, vol. 33, pp. 705-706, 1997.
- [9] H. Lee, "Multiple fiber Bragg grating sensor system using code-division multiple access," *Appl. Optics*, vol. 41, no. 25, pp. 5245-5248, Sep., 2002.

저 자 소 개

이 호 준(정회원) 제39호 SD편 제10호 참조