

광섬유센서를 이용한 고속주행 트럭의 축중 측정에 관한 연구

Study on the High Speed WIM(Weigh-in-Motion) Measurement with Optical Fiber Sensor System

조성규* 김기수** 배병우***
Cho, Seong-Kyu Kim, Ki-Soo Bae, Byoung-Woo

ABSTRACT

In this paper, high speed fiber optic sensor weigh-in motion (WIM) system is proposed. Bragg gratings which have several advantages such as good reproducibility and good multiplicity compare to other optical fiber sensors are used for the system. Fabry-Perot filter for the signal process, which cannot be used in the high speed measurement because of the limitation in fast operation of PZT, is excluded. A new signal processing system which employs bandwidth filter is proposed and bridge type new sensor package design is also proposed. Design of the mold supporter is modified to round shape and then supporting points do not change. The data from the fiber sensors show identical and linear behavior to the axle weight. The proposed fiber optic WIM system is tested in the laboratory and experimented with actual trucks.

The new concept of calibration is introduced and calculated by the experiments. The calibrated weight data show good approximations to real axial weights regardless the velocities of the truck.

1. 서론

1.1 연구배경

최근 정보통신의 눈부신 발달로 우리의 삶이 크게 변화하고 있다. 또한 도로교통체계에 대한 인식과 발달도 그중 하나이다. 도로의 경우 과거에는 차량이 달릴 수 있는 단순한 공간 정도로 인식하였으나 이제는 도로와 차량 그리고 운전자가 삼위일체가 되어 상호정보를 교환하면서 이용하는 것이 도로 공간이며 교통 정보뿐만 아니라 생활에 필요한 각종 정보를 접하고 이를 활용할 수 있는 생활의 공간으로 인식하게 된 것이다. 이러한 인식의 변화에 따른 산물이 지능형 교통체계 ITS (Intelligent Transport Systems)이다.

ITS는 정보통신과 제어기술 등 첨단기술을 응용한 교통정보 감지기술과 실시간 정보의 송·수신기술, 시스

* (주)아이세스 연구원

** 호서대학교 벤처전문대학원 교수

*** 고속도로 정보통신 공단 책임연구원

템 통합과 제어기술 그리고 운영기술을 기존의 도로교통체계에 접목하여 새로운 개념의 도로교통체제를 만들어낸 것이다.

ITS를 통해 도로관리자는 즉각적인 교통량 파악과 제어를 할 수 있고 신속한 돌발 상황 관리와 교통법규 위반 행위 및 과적차량의 자동 단속, 요금의 자동 징수 등이 가능하다.

한마디로 ITS가 구축되면 교통시설 이용의 극대화와 교통소통 및 교통서비스의 개선, 교통사고의 획기적인 감소가 가능하게 되는 것이다. 도로교통전문가들은 도로에 ITS를 구축할 경우 교통 혼잡은 30%가량 완화되고 교통사고는 60% 가량 줄어들 것이라는 견해를 밝히고 있다.

이러한 ITS의 체계적인 기술개발을 위해 정부에서는 2005년까지 1230억원, 2020년까지 2366억원을 투자할 예정이라고 한다.

이렇게 많은 관심을 가지고 연구되어지고 있는 ITS에 대해 본 논문에서는 ITS에 중요한 설비중 하나인 고속용 과적차량 단속시스템인 기존 WIM(Weigh In Motion)시스템의 문제점들을 개선하고자 한다.

1.2 기존 축중 WIM 센서의 문제점

시스템의 설치비, 수명, 유지관리를 포함한 연간 소요 비용면에서 각 센서를 비교해 보면 정확도나 수명에 있어서는 load cell을 사용하는 것이 유리하지만 load cell은 크기가 클 뿐만 아니라 설치비용도 매우 비싸다. 반면 저가형의 압전센서는 설치는 간단하지만 성능, 짧은 수명의 단점이 있다. 또한 전자적인 센서의 경우 전자파에 대한 간섭을 크게 받으므로 오작동의 우려가 있으며, 리드선에서 발생할 수 있는 전자파의 장애로 인하여 원거리의 신호 전달이 어려운 단점이 있다. 특히 미래형 고속도로 시스템에서는 무선 전파나 인공위성을 통한 항법 시스템이 도입되므로 강한 전자기장의 환경 속에서는 적합하지 않다. 또한 광센서는 표 1.1와 같은 종류가 있으며 각각의 장단점을 가지고 있다. 본 논문에서 다룬 WIM System은 FBG 센서를 채택하고 있다.

표 1.1 센서 시스템의 비교

센서종류	동작원리	신호처리 방식	신호처리 복잡성	감도	특징
강도센서	Microbending	-광강도 측정	○	×	-구성과 신호처리가 간단 -수명이 짧음 -강도잡음과 전송손실에 민감
간섭형 센서	Michelson	-산의 수 계수 -homodyne방식 -heterodyne 방식	×	○	-reference의 보호 -원하지않는 다른신호로부터 보호 -간섭센서이므로 매우 민감함 -신호처리가 매우 복잡함
	Mach-Zehnder		×	○	-두신호의 위상차로 신호를 측정 -sensing구간이 명확하지 않음 -매우 민감하고 신호처리가 복잡함
FBG 센서	Bragg wavelength shift	-edge filter방식 -scanning filter 방식	△	△	-온도 안정화 필요 -다중화 측정 가능 -Bragg 파장의 측정이 쉬움 -신호처리 간단

Microbend 센서는 시스템이 간단하나 광섬유의 외부 환경으로의 노출이 심하기 때문에 수명이 짧은 문제점이 있으며 간섭계 센서인 Michelson과 Mach-Zehnder 간섭계 센서는 매우 높은 sensitivity를 보이나 신호의 fading 등을 처리하는데 있어서 여러 문제점이 있다.

1.3 FBG 센서

FBG 센서에서 반사되는 파장을 검출하는 방법으로는 일반적으로 edge filter를 이용하는 방식과 scanning filter를 이용하는 방식이 있으며 이 방식들을 그림 1.1과 그림 1.2에서 보이고 있다. 그림 1.1에서 edge filter는 Bragg 파장의 변화를 광의 강도 변화로 변환하므로 광 다이오드로 수신된 전류의 크기로 인가된 물리량을 계산할 수 있다. scanning filter를 이용하는 방식은 그림 1.2과 같이 filter에 전압을 인가하여 파장을 스캐닝 함으로써 filter의 통과 파장이 변화시키는 것이다.

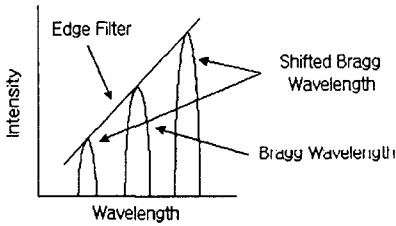


그림 1.1 Edge filter 방식

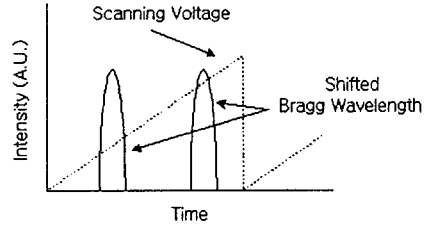


그림 1.2 Scanning filter 방식

1.4 광섬유 센서 시스템의 구성

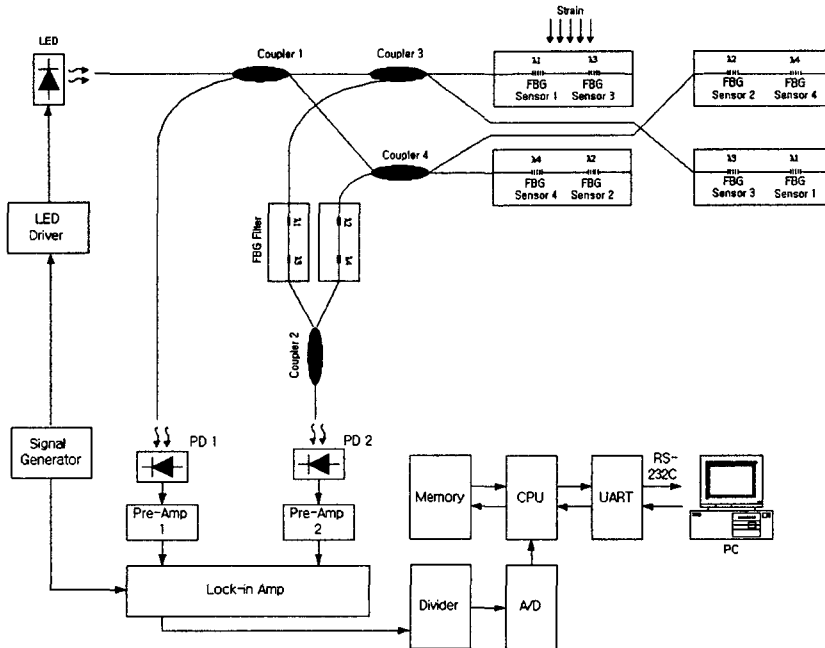


그림 1.3 고속용 자동계측 시스템의 구조

수신 신호의 잡음을 제거하기 위해 신호발생기에 의해 LED를 변조하고, 변조된 빛은 결합기 1과 결합기 3, 4를 통하여 FBG 센서에서 반사되어 결합기 2로 되돌아온다. 반사된 신호는 결합기 3, 4에서 둘로 분리되어 한 신호는 센서와 동일한 특성을 갖는 FBG 필터와 결합기 2를 통하여 광 다이오드 2에서 수신되고 FBG 필터에서 반사된 신호는 다시 결합기 1을 통해 광 다이오드 1에서 수신되어 각각 검파된다. 필터를 통한 쪽은 외부 물리량으로 인한 FBG 센서 반사파장의 변화에 의한 광 전력의 변화량이 수신되며 센서에서 반사되어 온 다른 쪽 신호는 광 전력에 비례하는 양의 빛이 수신된다. 이러한 두 신호를 검파하여 광소자의 손실의 변화와 LED 자체의 출력 광 전력 변화 등을 보상하며 온도 등 무게 이외의 외부의 영향에 의해 변화한 광 강도 변화를 보상을 위해 나눗셈기를 사용하였다. 이 나눗셈기는 FBG 필터를 거치지 않은 신호와 필터를 거친 신호를 나눗셈 연산을 하여 출력한다. 필터를 통과한 신호는 스트레인으로 인한 FBG 센서 반사파장의 변화에 의한 광 전력의 변화량이 수신되며 필터에서 반사된 다른 쪽은 광 전력에 비례하는 양의 빛이 수신된다. FBG에서 반사되는 수신 신호는 lock-in 증폭기를 사용하여 신호 검출이 용이하도록 하였다.

이 시스템은 온도나 무게 이외의 외부의 영향에 의하여 변화한 FBG의 반사파장에 대한 보상을 위해 나눗셈기가 사용되며 FBG 필터를 거치지 않은 신호와 필터를 거친 신호를 나눗셈 연산을 하여 출력하게 된다.

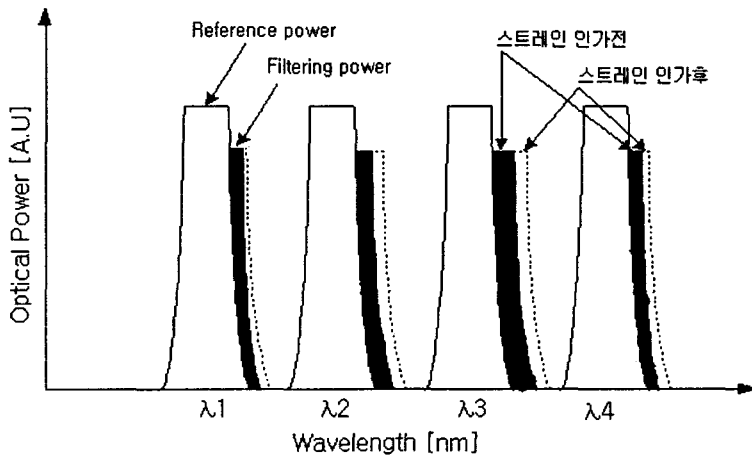


그림 1.4. 필터링 값과 Reference 값

FBG 센서의 압력을 측정하기 위한 송신부의 광대역 LED는 1,550nm의 파장을 발생하며 드라이버에 의해 구동된다. LED 구동부는 신호발생기에서 발생한 정현파에 의해서 변조되며 LED 구동부에 의해 변조된 빛이 LED로부터 광 결합기를 거쳐 광섬유를 통과한 후, FBG 센서에 전달된다. FBG 센서에 압력이 가해졌을 경우 FBG 반사 스펙트럼의 변화를 보이고 있다. 물리량 즉 압력을 가할 경우 FBG 센서의 중심파장은 천이를 일으키고, 수신부에서 FBG 필터를 이용한 신호처리 시스템으로 파장 변이에 따른 수신 광전력의 변화를 측정함에 의해 압력을 측정할 수 있다.

2. WIM용 Mold 받침대 개선

2.1 기존 Mold 받침대 특성 검토

기존 몰드 받침대에 대한 특성을 검토한 결과, 다음의 두 가지 문제점을 알 수 있었다.

첫째, 하중-변형을 특성이 선형이 아닌 2차식의 형태로 나타나고 있다. 이는 받침대의 지점이 초기 하중에는 마찰력에 의하여 지지되는데, 이 마찰력과 수평변형을 주는 힘이 평형을 이룰 때까지 초기 변형이 크게 나타나는 것임을 알 수 있다.

둘째, 각 받침대 별로 하중-변형을 특성이 분산되어 서로 일치하지 못하고 있다. 이는 몰드 받침대 제작시 절단이나 가공을 하며 발생하는 열에 의하여 재질특성이 변화하는 것이 원인이라 생각된다.

2.2 하중-변형을 특성에 따른 Mold 받침대 개선

몰드 받침대의 이런 문제점들은 나중에 몰드에서 나오는 값들을 합산하고 보정하는데 많은 어려움이 있게 한다. 따라서 이 두 가지 문제점은 반드시 해결하여야하므로 이를 해결하기 위하여 다음과 같이 몰드 받침대에 대한 구조 개선과 열처리 등을 실시하였다.

2.2.1 구조적 개선

기존 몰드 받침대의 구조적 특성상 문제점은 하중-변형을 관계가 선형이 아닌 2차식의 형태로 나타나는 것이었다. 이는 몰드 받침 밀면이 자유단인 상태에서 마찰력에 의해서만 지지력을 받기 때문에 초기 하중 인가시 마찰력과 평형을 이룰 때까지 수평 변형이 크게 나타나게 되며, 약 2~3 ton의 하중이 가해져야만 지점이 안정되어 Steel의 선형성이 나타남을 알 수 있었다. 이러한 현상으로 인하여 그림 2.1과 같이 하중-변형을 그래프가 2~3 ton 근처에서 변곡점을 가지는 2차식의 형태로 표현될 수밖에 없었다.

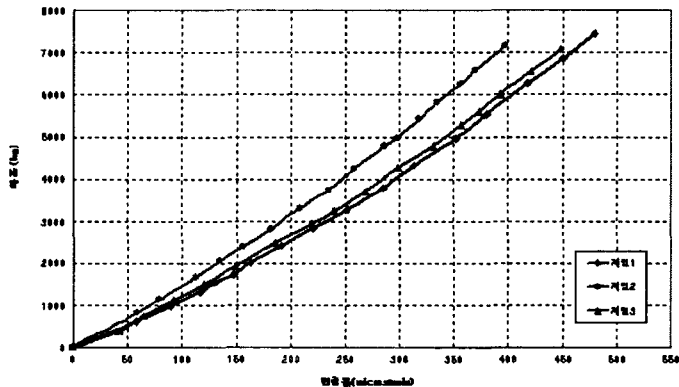


그림 2.1 기존 몰드 받침대의 하중-변형을 특성

이와 같은 기존 몰드의 특성을 개선하기 위하여 첫 번째로 그림 2.2처럼 몰드 받침대의 지점 부분을 원형으로 개선하여 Steel의 탄성영역 성질을 최대한 활용할 수 있도록 하며 하중에 따른 선형성을 확보하고자 하였다.

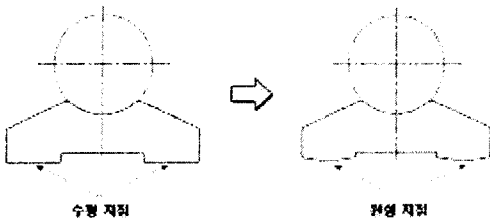


그림 2.2 몰드 받침대의 구조개선

그림 2.2와 같이 개선된 몰드 받침대를 스트레인 게이지를 이용하여 실험한 결과 그림 2.3과 같이 기존 몰드 받침대에 비하여 우수한 선형성을 나타냄을 알 수 있었다. 또한, 몰드 받침을 개선함으로써 표 2.2와 같이 추세선 식을 1차식으로 사용하여도 R^2 값이 0.998이상의 충분한 상관성을 유지할 수 있었다.

2.2.2 Mold 받침대의 내구성 증진(열처리)

2.2.1 에서와 같이 몰드를 개선과 함께, 각각의 하중-변형을 특성을 동일하게 하기 위하여 몰드 받침에 대하여 동시에 열처리를 실시하였다.

몰드 받침의 로크웰 경도 시험 결과, 각각의 몰드 받침대가 로크웰 슈퍼피셜 경도 HR45T로 동일하게 측정되었다. 또한, 열처리에 의해서 하중-변형 특성이 그림 2.4에서처럼 분산되었던 그래프가 거의 일치하도록 개선되었다. 열처리를 하여 최대 변형율은 감소하였으나, 각 몰드 받침대별 오차는 최대 20~30 micro-strain 으로 약 3~4%의 오차율을 보였다.

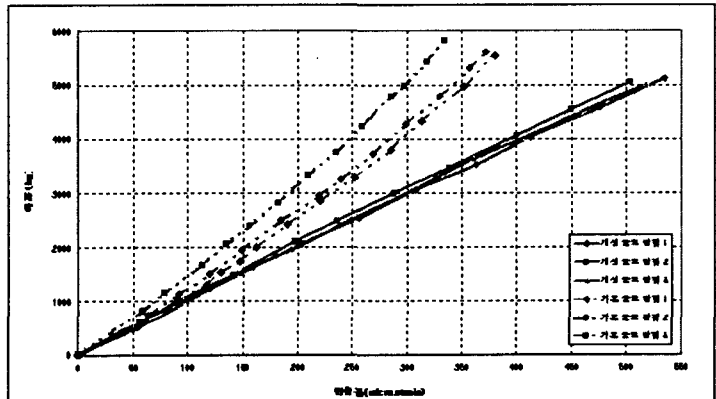


그림 2.3 기존 몰드와 개선 몰드의 하중-스트레인 특성 비교

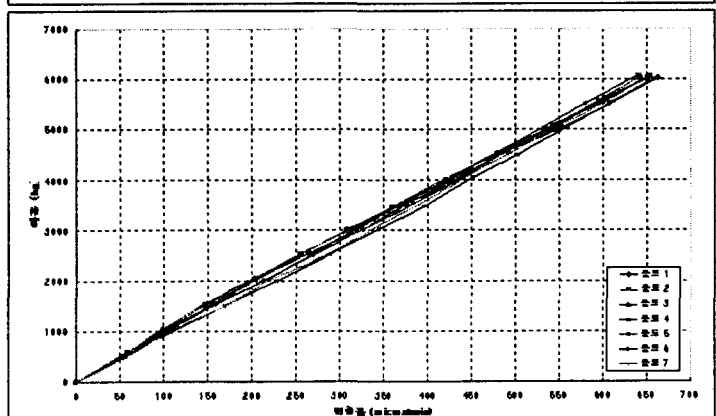


그림 2.4 열처리후 몰드 받침대 특성

3. WIM용 Mold 구조 개선

3.1 개선된 Mold 의 구조

기존 몰드는 처짐을 고려하여 단면 2차 모멘트가 큰 직사각형 단면을 갖는 단순보의 형태로 설계되었다. 그러나 Steel 재질의 직사각형 단면 몰드는 그 무게가 상당하여 이동 및 취급, 관리에 많은 단점을 보여주었기에 이를 개선하고자 하였다. 그 결과, I 형 단면을 사용하여, 무게를 최대한 줄이며, 처짐의 증가를 최소로 하는 방향으로 개선하였다.

그림 3.1은 I 형 단면을 적용한 몰드의 최종 도면이며, 그림 3.2는 구조 개선된 몰드의 실제 모습이다.

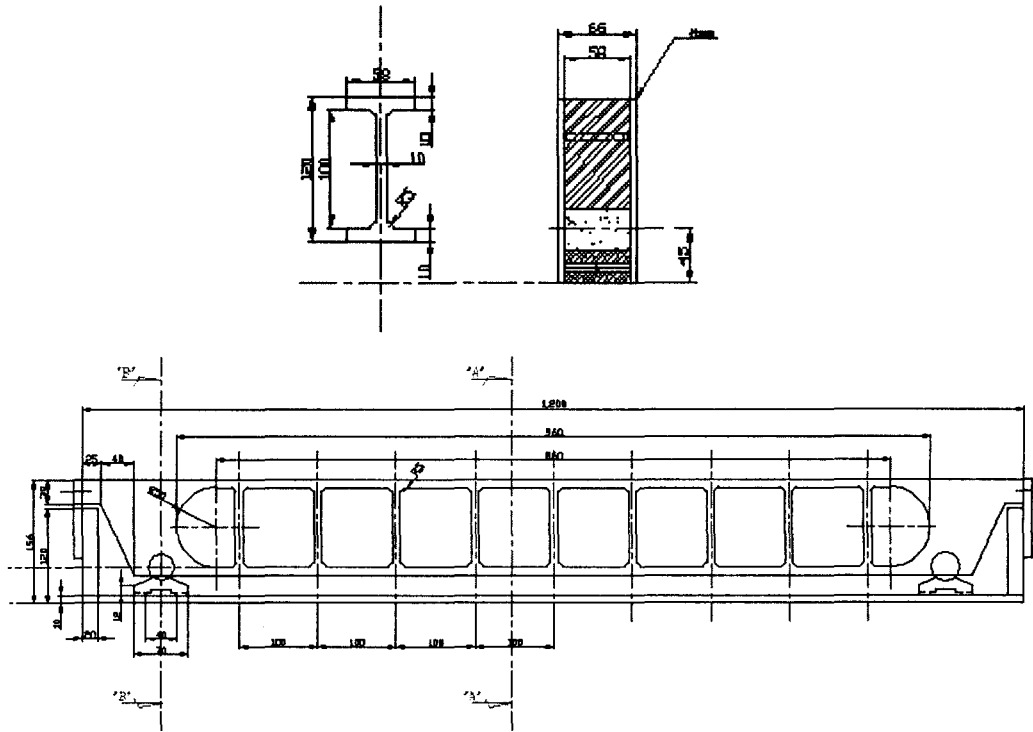


그림 3.1 개선 몰드 최종 도면



그림 3.2 전체 조립후 완성된 개선 몰드

4. 하중 재하 시험

4.1 하중 시험

대전에 있는 한 도로에서 동적하중 재하 시험을 시행하였다. 그림 4.1은 WIM을 현장에 설치한 모습이며, 그림 4.2는 현장에서 23ton 덤프트럭으로 실험을 하였을 때 각 축에 대한 오실로스코프에 인가된 출력 파형이다.

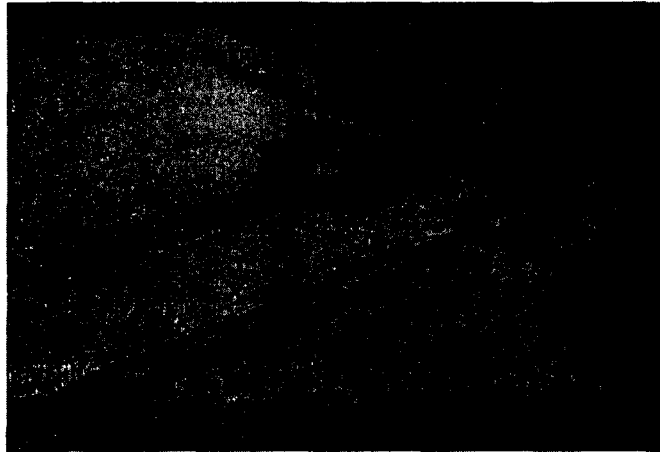


그림 4.1 도로에 WIM Mold 설치된 모습

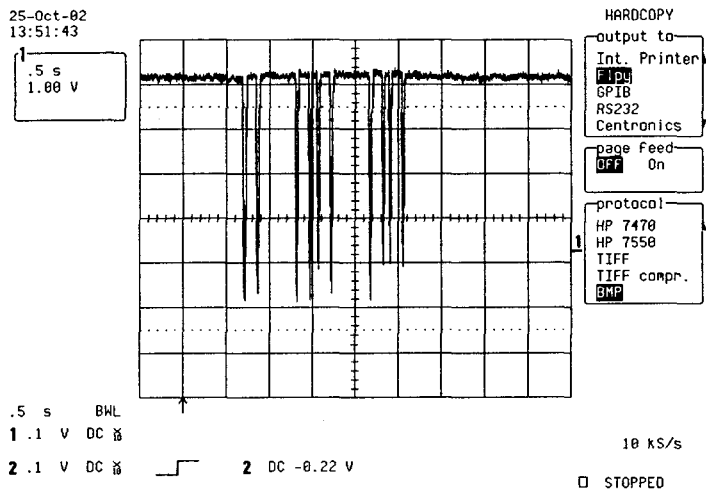


그림 4.2 23톤 트럭에 의한 동적하중의 각축에 대한 오실로스코프의 출력파형

본 동적하중 실험의 경우, 차량을 고속으로 운행하여 실험을 실시하였다. 하지만 차량이 고속으로 운행될 수록 몰드에서의 스트레인 값이 작아지는 경향이 나타났다. 따라서 속도에 따른 보정이 필요한 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서 가장 중점을 둔 것은 기존 광섬유센서를 이용한 고속 계중시스템에 필요한 WIM Mold의 최적화이다. 본 논문에서 보였듯이 기존 Mold의 문제점인 FBG센서의 변형을 생성시키는 몰드받침대의 하중-변형을 관계가 선형이 아닌 2차식의 형태로 나타나는 것은 몰드의 구조개선과 열처리를 통한 몰드받침대의 변형특성의 최적화와 Mold의 이동과 설치시 문제가 되었던 몰드의 무게를 줄이기 위한 I 형태로의 구조개선은 전체 Mold의 처짐이 약 0.154 cm로 이 수치는 매우 작은 값이므로 전체 Mold에 대한 최적화도 이루어졌다고 사료된다. 이는 여러 번의 실내실험과 실외실험으로 검증하였다.

따라서 이번에 새로 개선된 WIM Mold는 고속계중시스템에 사용 적합한 것으로 사료된다. 향후 연구에서는 시스템의 안정화에 대한 연구를 더욱 활발히 실행한다면 기존의 계중시스템과 속도측정시스템을 병합한 새로운 시스템으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 교통개발연구원, 화물 과적의 원인과 대책, 1994.
2. 한국건설기술연구원, 도로교통량 조사 운영체계 수립 및 관련 기술 개발, 1995.
3. 한국건설기술연구원, 과적차량 단속체계 개선방안 연구, 1995.
4. 한국건설기술연구원, 지능형 교통시스템 기본계획(안) 수립을 위한 연구, 1996.
5. 한국건설기술연구원, 도로 손상비 부과 기준 개발 연구, 1997.
6. Traffic Technology International (1995) "New applications for Weigh-in-motions technology"
7. Shah P., and Udawadis, F. E.(1978), " A Methodology for Optimal Sensor Locations for Identification of Dynamic Systems ", J. Appl. Mech., 45, 1978., pp188-196.
8. R. M. Measures, Fiber optic sensor considerations and developments for smart structures Proc. SPIE, Vol. 1588, pp. 282, 1991.
9. W.W. Morey, J.R. Dunphy, and G. Meltz, "Multiplexing Fiber Bragg Grating Sensors" SPIE, Vol. 1586, Paper #22, Boston, pp. 216-224.
10. K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B.S. Kawasaki, Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides. Application to Reflection Filter Fabrication Appl. Phys. Lett., Vol. 32, No.10, pp. 647-649, May 1978.
11. K. P. Koo and A. D. Kersey, "Bragg Grating-Based Laser Sensors Systems with Interferometric Interrogation and Wavelength Division Multiplexing" Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, NO.7, pp. 1243-1248, July 1995.
12. A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter Optics Letters, Vol. 18, No. 16, pp. 1370-1372, August 15, 1993
13. W.W. Morey, G. Meltz, and W. H.Glenn, Fiber Optic Bragg Grating Sensors SPIE, Vol. 1169, pp. 98-106, 1989
14. K. T. V. Grattan and B. T. Meggitt, Optical Fiber Sensor Technology.
15. A. D. Kersey, K. P. Koo and M. A. Davis, "Fiber Optic Bragg Grating Laser Sensors" SPIE, Vol. 2292 Fiber Optic and Laser Sensors XII , pp.102-112, 1994.

16. Dr. A. T. Bergan Preserving Highway Infrastructure Using Weigh-In-Motion (1998)
17. 이호준, 송준용, WDM을 위한 Fabry-Perot 필터의 로킹 시스템대한전자공학회, Vol. 34-D-6, pp. 58-64, 1997.
18. J. stone and L. W. Stulz, Pigtailed high-finesse tunable fiber Fabry-Perot Interferometer with large, medium and small free spectral range, Elect. Lett, 23(15), pp. 781-783, 1987.
19. M. A. Davis and A. D. Kersey "Application of a Fiber Fourier Transform Spectro- meter to the Detection of Wavelength- Encoded Signals form Bragg Grating Sensors" Journal of Lightwave Technology, Vol.13, NO.7, pp.1289-1295, JULY 1995.
20. A. D, Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, "High-Resolution Fiber-Grating Based Strain Sensor with Interferometric Wavelength- Shift Detection" ELECTRONICS LETTERS, 30th, , Vol.28, No.3, pp. 516-518 ,January 1992.