

# 첨단계측센서를 이용한 철도 구조물의 모니터링

## Railway structure health monitoring using innovative sensing technologies

이 규 완†·정 성 훈\*·박 은 용\*\*

Lee, Kyu-Wan, Jung, Sung-Hoon and Park, Eun-Yong

**Key Words** : Fiber optic sensor(광섬유센서), Wireless sensor system(무선계측시스템)

### ABSTRACT

Recent development of fiber optic sensors and wireless sensor technology, made structural health monitoring of railway structures cost effective.

In this paper, a micro bending fiber optic rail pad sensors are evaluated for train axle force measurement. In order to assess the usability of FBG fiber optic sensors for short-term bridge measurement, the FBG sensors and conventional strain gauges are installed at the same points and the strain results are compared. Also the impact factors are calculated using the FBG strain responses and the results are compared with the conventional sensor responses. A running KTX train was instrumented with wireless sensor system to measure the vibration characteristics and the results are compared with conventional wire sensor system.

### 1. 서 론

우리나라의 경제성장은 지난 30여 년간 선진 외국으로부터의 기술도입, 생산위주의 양적 성장에 치중해 왔으며, 경제성장과 더불어 구축된 국가주요 사회 기반시설의 노후화 증가로 인하여 사회·경제적 손실이 지속적으로 발생하고 있다. 국내에서는 성수대교 및 삼풍백화점과 같은 이러한 일련의 붕괴사고로 인하여 1995년 안전점검 및 정밀안전진단 결과 중대한 결함이 있는 경우에 해당 시설물의 관리주체가 행하는 시설물의 보수보강 등의 조치를 확인할 수 있는 절차를 마련하고, 시설물의 안전 및 유지관리 정보를 통합관리하는 시설물 정보관리 종합시스템을 구축함으로써 시설물 이용자의 안전을 확보하고 시설물의 안전 및 유지관리를 보다 효율적으로 추진하려는 목적으로 시설물의 안전관리에 관한 특별법을 제정·공포하여 운영하고 있다.

그러나 현재 통용되는 계측기와 계측용 센서는 주로 전기저항식으로 이루어져 있어 부식, 전자기영향, 작업성 등 여러 문제점을 안고 있다. 또한 단기 계측 시에도 과도한 리드선 작업으로 인해 많은 비용과 시간이 소요될 뿐만 아

니라 계측 신호의 신뢰성 저하를 초래한다. 또한 전자기파의 영향을 많이 받기 때문에 철탑, 지하철, 고속철도 등과 같이 고전압의 영향이 큰 구조물 인근에서는 측정이 거의 불가능하거나, 측정을 하더라도 노이즈의 영향이 상당히 크게 작용되는 단점이 있다. 이러한 기존 시스템의 단점을 극복하기 위한 대안으로 최근에 광섬유센서(Fiber Optic Sensor)와 WSN(Wireless Sensor Network)를 적용하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다.

본 논문에서는 레일의 효율적인 유지관리 및 교체주기 산정을 위한 열차의 통과톤수 측정에 있어 마이크로벤딩 광섬유 레일패드 센서의 적용성을 실험적으로 검토하였으며, 교량의 재하실험시 전기저항식 변형률게이지와 FBG 광섬유센서를 동시에 부착하여 각 센서의 응답특성 및 FBG 광섬유센서를 이용하여 충격계수를 산출하여 변위계를 이용하여 산출한 결과와 비교하였다. 또한, KTX 열차의 진동계측을 수행함에 있어 케이블 작업이 불필요한 무선계측 시스템을 도입함으로써 기존 유선시스템의 대체 가능성을 검토하였다.

### 2. 기존 장기 계측시스템의 한계성

「한강교량 On-line 안전감시 시스템 확립을 위한 실천 방안 연구(2004)」에 의하면, 국도상 장기계측시스템이 도입된 4개 교량의 측정항목별 장기계측자료 분석결과와 같이, 계측시스템의 도입 목적은 교량의 장기거동을 파악하여

† 한국유지관리(주)

E-mail : smart@seoul.korea.com

Tel : (02) 830-7071, Fax : (02) 830-5256

\* 한국유지관리(주)

\*\* 한국유지관리(주)

대상 구조물의 상태와 수명을 평가하기 위하여 도입된 것이나, 프로그램, 컴퓨터 오류, 또는 계측시스템 자체가 오랫동안 가동되지 않는 경우가 대부분이었으며, 그 중 표 1에서와 같이 대표적인 4개 교량 센서의 가동현황을 살펴 본 결과, 50~100%가 응답이 없거나 이상신호가 측정되는 불량한 상태인 것으로 조사되었다.

여기에 사용된 계측기와 계측용 센서는 주로 현재 상용화 되어 있는 전기저항식으로 이루어져 있어, 일정 분석기간 동안의 센서 유형별 불량률은 온도계(58.1%), 응력계(89.2%), 가속도계(55.6%), 지점 및 신축이음변위계(44.4%), 경사계(50.0%), 지진계(100%), 풍향풍속계(100%)인 것으로 조사되었다. 이는 전기저항식 센서 시스템의 부식, 자기열 효과, 전자기파의 영향, 케이블 길이 그리고 계측시스템의 복합적인 원인에 의한 것으로 교량의 장기적인 거동과악 이전에 계측시스템 자체의 문제점이 내재되어 계측시스템의 활용도가 미약한 대표적인 예이다.

표 1. 측정항목별 장기계측자료 분석결과

측정항목	교량명	분석기간	측정 개수	불량 개수	불량율
온도계	K교	2000.4 ~ 2002.5	11	11	총센서수 : 31개 불량개수 : 18개 불량비율 : 58.1%
	B교	2000.3 ~ 2002.5	8	3	
	S교	2000.12 ~ 2002.5	4	1	
	SK교	2000.1 ~ 2001.5	8	3	
응력계	K교	2000.4 ~ 2002.5	19	19	총센서수 : 65개 불량개수 : 58개 불량비율 : 89.2%
	B교	2000.3 ~ 2002.5	8	7	
	S교	2000.12 ~ 2002.5	28	25	
	SK교	2000.1 ~ 2001.5	10	7	
가속도계	K교	2000.4 ~ 2002.5	9	4	총센서수 : 18개 불량개수 : 10개 불량비율 : 55.6%
	B교	2000.3 ~ 2002.5	4	1	
	Ch교	2001.8 ~ 2002.5	5	5	
지점 및 신축이음변위계	K교	2000.4 ~ 2002.5	6	2	총센서수 : 18개 불량개수 : 8개 불량비율 : 44.4%
	B교	2000.3 ~ 2002.5	4	2	
	S교	2000.12 ~ 2002.5	2	2	
	SK교	2000.1 ~ 2001.5	6	2	
경사계	K교	2000.4 ~ 2002.5	2	2	총센서수 : 14개 불량개수 : 7개 불량비율 : 50%
	B교	2000.3 ~ 2002.5	8	1	
	S교	2000.1 ~ 2001.5	4	4	
지진계	K교	2000.4 ~ 2002.5	3	3	불량비율 : 100%
풍향풍속계	K교	2000.4 ~ 2002.5	1	1	불량비율 : 100%

## 2. 광섬유센서를 이용한 구조물의 모니터링

### 2.1 광섬유센서의 종류 및 장점

광섬유센서는 측정방식에 따라서, OTDR, Micro-bend type 등의 광강도센서, 마이켈슨, 마하젠더, 페브리-페롯 등의 간섭형과 브래그격자 광섬유센서(FBG, Fiber Bragg Grating) 등이 있다. 주성분이 게르마늄-실리카 유리로 구성되어 있어 전자기파의 영향을 받지 않으며, 수분이나 습기에 의한 부식이 발생하지 않는 물리적인 장점이 있다. 또한, 광섬유는 km당 0.2 dB 이하의 매우 작은 전송손실을 가지고 있기 때문에 수십 km까지 광섬유를 연장할 수 있는

장점이 있어, 교량, 철도, 레일, 파이프 라인과 같이 길이방향으로 매우 긴 구조체에 적용하기에 큰 장점을 가진다. 이러한 우수한 특성으로 인해 광섬유센서는 기존의 전기저항식 센서가 가지고 있는 여러 단점을 해결할 수 있으며, 구조물의 미세한 변형률 및 온도를 측정할 수 있어 기존 측정소자의 대체 소자로 각광을 받고 있다.

본 논문에서 언급할 마이크로벤딩 광섬유센서와 FBG 광섬유센서의 원리는 다음과 같다.

#### (1) 마이크로 벤딩 광섬유센서

마이크로 벤딩 광섬유센서는 미세휨(micro bending)에 의하여 발생한 손실로 인한 광선의 감소량을 측정하여 원하는 물리량을 검출하는 방식으로, 프랑스의 에펠탑에 적용된 바 있다(그림 1 참조). 광원을 광섬유에 입사시키고 외력이 작용하면 인위적인 굴곡에 의하여 광섬유에 휨거동이 발생하며, 광선의 양은 거리에 따라 감소한다. 제작과정이 간단하고 경제적이지만, 상대적으로 민감도와 정확도가 떨어지는 단점이 있다.

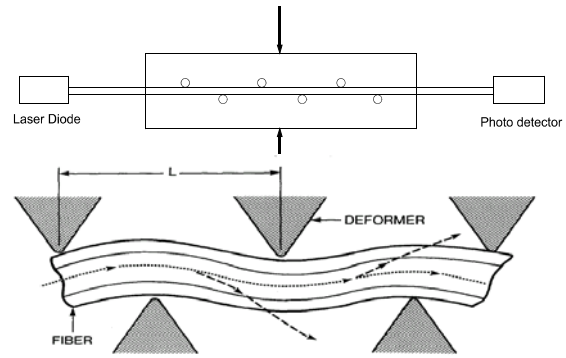


그림 1. 마이크로 벤딩 광섬유센서

#### (2) 브래그격자 광섬유센서

FBG 광섬유센서는 광원을 광섬유에 입사시킬 경우 브래그 조건에 의한 파장 성분은 브래그 격자 광섬유에서 반사되고 나머지 파장 성분은 그대로 통과하는 원리를 이용한다. 광섬유에 전달된 광원의 스펙트럼, 브래그 격자를 통과한 광신호의 스펙트럼, 그리고 브래그 격자에서 반사된 광신호의 스펙트럼이 그림 2에 나타나 있다.

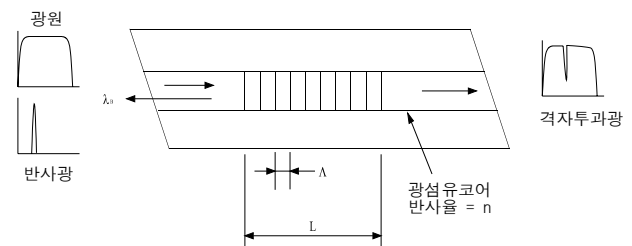


그림 2. 브래그 격자 광섬유의 구조

광섬유 격자의 온도 및 변형률의 변화에 대한 브래그 파장의 변화는 광섬유로 측정이 가능한 범위에서는 대체로 선형적이며, 단순화된 선형 계수  $K_T$  와  $K_\epsilon$  만으로도 센서 특징을 표현할 수 있다. 브래그 격자 광섬유 센서는 측정량이 브래그 반사파장의 변화량이므로 측정이 간편하며, 광섬유 격자의 광 반사파장의 선폭이 좁기 때문에 분해능이 높은 센서를 구성할 수 있다. 또한 브래그 반사 파장이 서로 다른 광섬유 격자들은 서로 영향을 받지 않으므로 하나의 광섬유를 이용한 다중점 측정인 멀티플렉싱이 가능한 장점이 있다.

## 2.2 마이크로 벤딩 레일패드 센서

열차의 통과톤수는 레일 마모의 직접적인 원인이며, 효율적인 레일의 유지관리를 위하여 반드시 필요한 측정항목이다. 그러나 아직까지도 대개의 경우에는 현장점검자의 육안 관측 또는 경험적인 판단에 의존하거나 탐승인원 파악을 통한 간접적인 추정방법을 사용하고 있어, 과학적이고 체계적인 레일의 교체주기 산정이 이루어지고 못하고 있는 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 UTM을 이용하여 레일패드의 압축실험을 실시하여 하중증가에 따른 응답특성 및 반복하중에 대한 응답의 재현특성을 실험적으로 검증하여, 열차의 통과톤수 모니터링을 통한 레일의 체계적인 유지관리에 마이크로 벤딩 레일패드 센서의 적용성에 관한 기초 연구를 수행하였다.

### (1) 실험 개요

패드센서-1에 대하여 2회 계단하중을 가하여 응답특성을 검토하였으며, 패드센서-2는 동일하중에 대하여 10회 반복하중을 가하여 응답의 재현성을 실험적으로 검증하였다.



그림 3. 실험전경 및 레일패드 센서

### (2) 계단하중에 따른 응답특성

그림 3에서와 같이 레일 밑에 레일패드 센서를 설치하고, UTM에 의하여 하중을 단계적으로 증가하면서, 응답을 측정하였다. 동일한 하중경우에 대하여 2회 반복실험을 수행

하여 응답특성을 검토하였다.

UTM 계단하중 재하결과, 응답은 선형적이지 않았으나, 4차 다항식으로 선형회귀 분석한 결과, 결정계수 0.99 이상, 그리고 응답 오차율은 최대 2% 미만의 응답특성을 실험적으로 확인하였다.

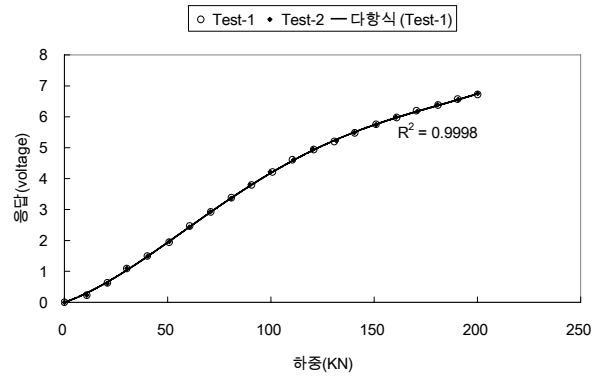


그림 4. 레일패드 센서-1의 하중-응답 곡선

### (3) 10회 반복하중에 대한 센서의 재현특성

패드센서-2의 경우에는 하중단계는 4단계로 제한하되 10회 반복실험을 실시하여 반복하중에 대한 재현특성을 검증하였다.

하중단계가 낮은 경우에는 UTM 하중이 미세하게 변동되어 오차가 상대적으로 크나 60KN 이상인 경우에는 2.07% 미만의 오차율로 하중재현 특성이 확보됨을 실험적으로 검증하였다.

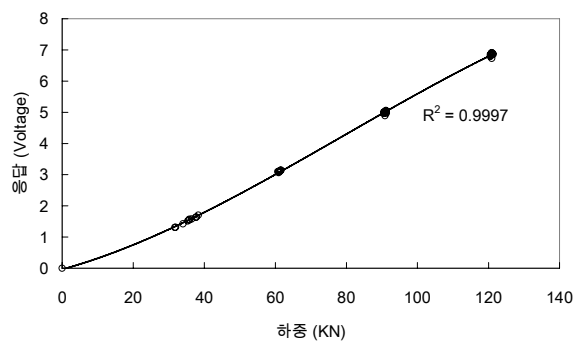


그림 5. 반복하중에 대한 센서-2의 응답 재현특성

따라서, 패드센서별 하중-응답곡선을 파악하여 보정을 실시한다면 신뢰성 높은 열차의 통과톤수 측정이 가능할 것으로 판단된다.

또 다른 응용분야로 교량진입부에서 레일패드 센서를 이용하여 교량을 통과하는 열차의 하중을 측정하고, 교량에서는 변형률, 변위 등 응답을 계속한다면 추가적인 노력 없이도 내하력 등 교량의 정량적인 상태를 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

### 2.3 FBG 광섬유센서를 이용한 교량의 단기계측

#### (1) 실험 개요

박판 전기저항식 변형률계이지는 취급이 용이하고 가격이 저렴하여 재하시험 등 교량의 상태를 평가하기 위한 단기계측시 일반적으로 사용된다. 그러나 전기저항식 변형률계이지는 실내실험과 같이 정제된 환경에서는 비교적 양호한 응답을 획득하기 용이한 반면, 현장에서의 환경 및 작업자의 숙련도에 따라서 노이즈가 매우 크거나 무전기 사용 등 전자기과의 영향에 의하여 신호가 왜곡되는 사례가 많다. 또한 케이블 작업이 번거로워 작업시간 및 인력이 많이 소요되는 단점이 있었다.

이에 반하여 FBG 광섬유센서는 하나의 케이블에 여러개의 센서를 설치할 수 있는 멀티플렉싱이 가능하여 작업시간을 단축할 수 있다. 뿐만 아니라, 전자기과의 영향이 없어 무전기 사용 등에 의한 영향과 주변환경 및 작업자의 숙련도와 상관없이 양호한 데이터 획득이 가능하여 재하실험과 같은 교량 단기계측시 적용사례가 점차 증가하고 있다.

종래의 bare FBG는 광통신 케이블에 격자를 생성하여 손상되기 쉬고 작업이 용이하지 않아 취급시 상당한 숙련도를 요구하였다(그림 6의 ‘거치대를 이용한 부착방식’ 및 ‘접착제를 이용한 직접부착’ 참조). 이러한 단점을 개선하기 위하여 복합재 등을 이용한 패치형식의 센서들이 적용되었으나 이는 1회 부착 후 재사용이 불가능하여 단기계측시 활용에는 제한적이었다. 그러나 최근에는 교량과 같은 구조물의 표면에 탈부착이 가능한 센서들이 개발되어 재사용함으로써 경제적이며 신뢰성 높은 데이터 획득을 위하여 재하실험과 같은 교량 단기계측시 FBG 광섬유센서를 적용하기 용이하다.

본 논문에서는 교량의 단기계측시 기존의 박판 전기저항식 변형률계이지와 광섬유센서를 동일 위치에 부착하여 차량 재하실험을 실시하여 응답특성을 비교하였으며, 기존 변형률계이지의 응답특성이 양호하지 못하여 주로 변위응답 측정결과에 의하여 산출하였던 충격계수를 FBG 변형률센서를 이용하여 추정하였다.



그림 6. 광섬유센서의 일반적인 부착방식

동일 위치에서 종래 박판 전기저항식 변형률계이지와 FBG 광섬유센서의 변형률 응답특성을 비교하기 위하여 그림 7의 C-위치 S2~S8에 각각 센서를 부착하여 차량 주행 실험을 실시하였다.

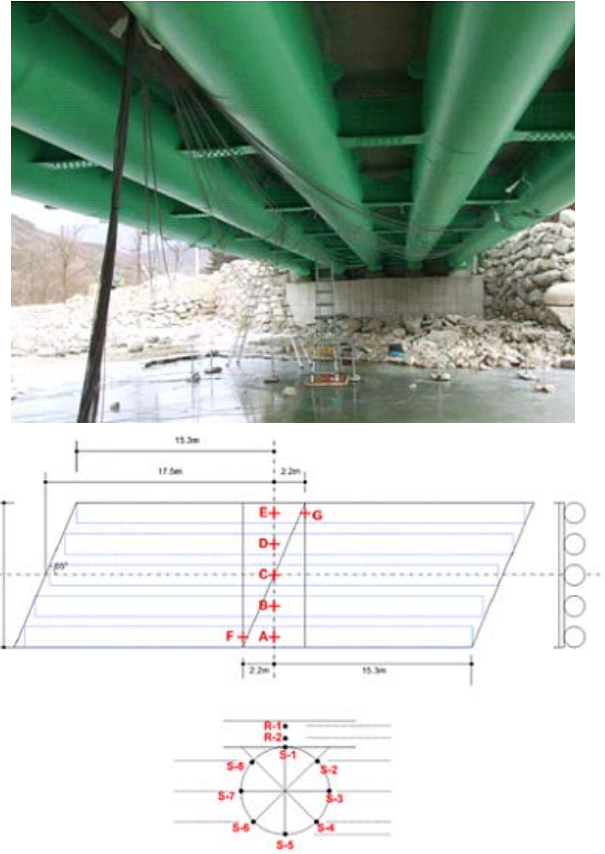


그림 7. 대상교량 전경 및 센서 부착 위치

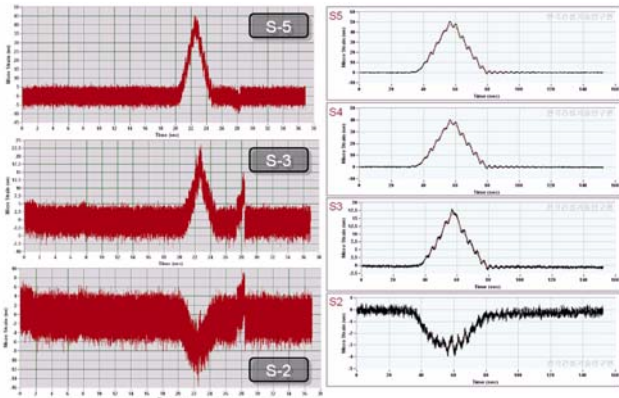
#### (2) 계측응답

차량 주행시 동일위치에서의 전기 저항식 변형률계이지와 FBG 광섬유센서의 변형률 응답은 그림 8과 같다.

일반적으로 전기저항식 변형률계이지의 노이즈 레벨은 장비특성 및 환경에 따라서 편차가 큰 편이며, 실내와 같이 양호한 환경에서는  $\pm 1\mu\epsilon$  미만으로도 계측이 가능하고, 현장에서  $\pm 2\mu\epsilon$  내외가 일반적이거나, 본 현장에서는 케이블 길이가 길었으며 동계계측 특성상 노이즈 레벨이  $\pm 5\mu\epsilon$ 로 계측되었다. 이는 환경 및 작업자의 숙련도에 따라서 전기저항식 변형률계이지의 응답 신뢰성이 크게 좌우됨을 입증하는 결과였으며, 이에 반하여 그림 8의 (b)에서와 같이 FBG 광섬유 변형률센서의 노이즈 레벨은  $\pm 0.5\mu\epsilon$  미만으로 양호한 응답특성을 보여 주었다.

또한 그림 8의 (a) 전기저항식 변형률계이지의 경우에는 무전기 사용으로 인하여 급격한 스파이크 등 데이터 왜곡이 발생되었다.





(a) 전기 저항식 변형률계이지 (b) FBG 광섬유센서  
그림 8. 차량 주행시 변형률 응답

### (3) 충격계수 산정

충격계수는 교량의 내하력 산정을 위한 보정계수로 교량 재하실험시 반드시 측정하여야 하는 측정항목이다. 충격계수는 변형률계이지 또는 변위계 응답의 동적 최대값과 정적 최대값의 비율에 의하여 산정하는데, 전기저항식 변형률계이지의 경우에는 일반적으로 노이즈가 많아 충격계수 산정을 위하여 일반적으로 변위계 응답을 사용한다. 그러나 교량의 변위측정은 고정점이 반드시 필요하기 때문에 교고가 높거나 교하공간이 하천이나 바다인 경우에는 치질측정이 어려운 경우가 많다. 따라서, 전기저항식 변형률계이지에 비하여 응답특성이 양호한 광섬유 변형률센서의 응답을 이용하여 충격계수를 산정한 후 변위계를 이용하여 추정된 결과와 비교하였다.

광섬유센서는 그림 7의 S5에 부착한 광섬유 변형률센서의 응답을 사용하였으며, 변위계에 의한 충격계수는 거더 3과 거더 4에 설치한 응답 결과와 비교하였다.

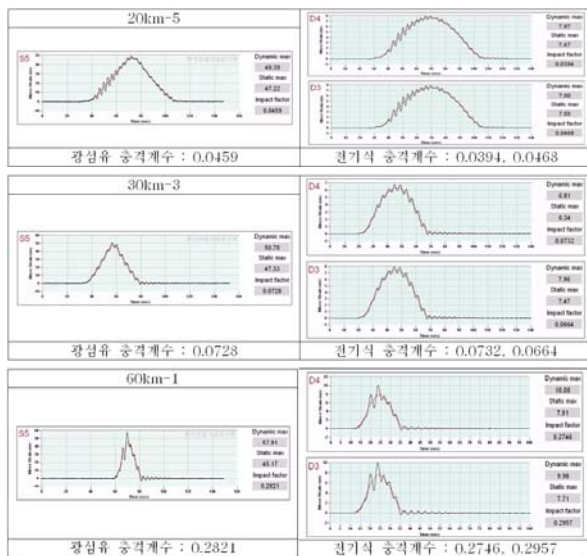


그림 9. 주행속도별 충격계수 산정결과

충격계수 산정결과는 표 2에서와 같이 주행속도가 높아질수록 오차율은 작아지는 경향을 보여 60km/h시에는 -1.07%의 오차율을 보였으며, 상대적으로 저속주행인 20km/h인 경우 최대 6.5% 미만의 오차율로 충격계수 산정이 가능하였다.

표 2. 충격계수 비교 결과

주행 속도 (km/h)	충격계수				오차율 (%)
	FBG 변형률계	전기식 변위계-1	전기식 변위계-2	전기식 변위계 평균	
20	0.0459	0.0394	0.0468	0.0431	6.50
30	0.0728	0.0732	0.0664	0.0698	4.30
60	0.2821	0.2746	0.2957	0.28515	-1.07

### 3. 무선계측기를 이용한 철도구조물의 모니터링

열차의 탈선은 국내외 열차사고의 대부분과 직결되어 있을 뿐만 아니라 탈선이 발생했을 때, 전복을 동반한 대형사고로 발전될 수 있으므로 열차의 안전 확보를 위해 가장 중요하게 다루어지고 있다. 대부분의 탈선의 원인으로서는 차량/궤도의 접촉에 의한 비선형적 동적 거동을 주로 언급하고 있으나, 탈선인자로는 차량 및 궤도의 이상뿐만 아니라 지진, 강풍 등 다양한 자연재해가 존재하고 있다.

최근들어 차량의 경량화 및 고속화에 따라 궤도이상에 의한 차량의 탈선에 대한 위험도는 점점 증가하고 있으므로 차량의 탈선에 대한 안전성 확보를 위해서는 궤도이상을 차량 주행 시 실시간 검지할 수 있는 시스템 개발이 필요하다.

이를 위하여 차체, 대차, 차축 등에 진동 가속도계를 설치하고 차량 주행 중 동일 이벤트에 의해 발생된 속도 및 가속도 응답으로 이상진동을 추출하여 이상개소를 실시간으로 검지할 수 있다. 그러나 유선방식의 기존 계측시스템은 케이블 포설이 매우 번거로울 뿐만 아니라, 노이즈에 매우 취약한 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 무선계측 시스템을 도입하였으며, 본 논문에서는 유무선 측정데이터를 비교함으로써 본 연구목적 달성을 위한 무선계측시스템 도입가능성을 실험적으로 검증하였다.

#### 3.1 무선계측 시스템

본 연구를 위하여 적용한 무선계측시스템 사양과 부착위치는 다음과 같다.



Max Channel	1Ch
Sensor Input	전압 출력 센서 /Strain Gauge
Sampling Rate	Max. 1KHz
분해능	16Bits
통신 주파수	2.4GHz 블루투스
통신거리	120m~1km

그림 10. 적용한 무선계측시스템 주요 사양

표 4. 센서 부착 위치

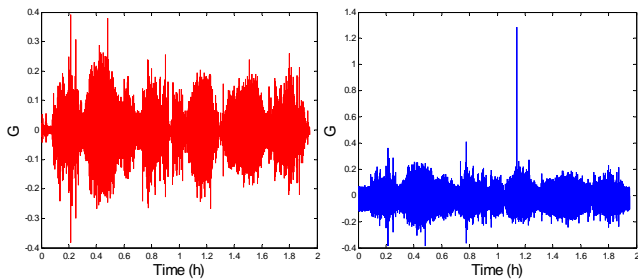
구분	설치위치	수직	좌우
차체	대차중심(I) 위	±2g 1ea	±2g 1ea
대차	차축(1) 좌 차륜(㉠) 위	±50g 1ea	±10g 1ea
차축	차축(1) 좌 차륜(㉠)	±50g 1ea	±50g 1ea



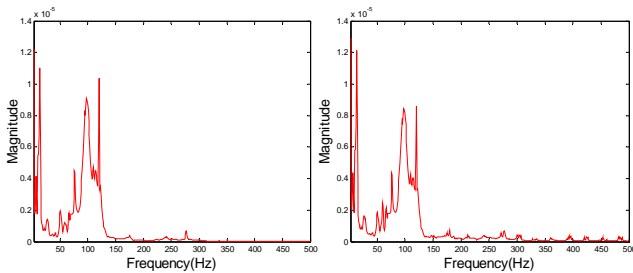
그림 11. 가속도계 및 무선계측기 설치 광경

### 3.2 실험방법 및 결과

KTX 열차에 유무선 진동가속도계를 설치하여 서울에서 동대구까지 주행하였으며, 측정결과 가속도 시간이력 및 주파수 분석결과는 다음과 같다.



(a) 무선데이터 로거 (b) 유선계측기  
그림 12. 가속도 시간이력



(a) 무선데이터 로거 (b) 유선계측기  
그림 13. 주파수 분석 결과

가속도 시간이력 비교 결과, 전반적으로 조금씩의 차이는 있지만, 유무선 모두 0.2g 전후의 응답특성을 보이고 있어, 유무선 모두 거의 유사한 응답이 계측된 것으로 판단되었다. 신호대 잡음비를 보면, 유선장비에 비하여, 무선장비의 응답

이 신호대 잡음비가 크기 때문에, 케이블에 의한 노이즈의 영향 등이 무선데이터 로거의 경우 훨씬 덜 민감한 것으로 판단된다.

주파수 분석결과 표 5에서와 같이 거의 동일한 응답결과를 확인할 수 있어 무선계측시스템을 이용하여 효과적으로 KTX 열차의 진동특성을 확인할 수 있었다.

표 5. 유무선 주파수 응답 비교 결과

주요 피크,	무선계측기(Hz)	유선계측기(Hz)
1	6.836	6.836
2	10.742	10.742
3	13.672	13.672
4	27.344	27.343
5	41.990	41.992
6	50.781	50.781

## 4. 결 론

철도 구조물의 모니터링을 위하여 첨단계측센서인 광섬유센서와 무선계측시스템을 적용하였으며, 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫 째, 열차의 통과톤수 측정을 위하여 마이크로 벤딩 광섬유센서 형식의 레일패드 센서의 적용성을 검증하였으며, 2.07% 미만의 오차율로 하중재현 특성이 확보되어 패드센서별 하중-응답곡선을 파악하여 보정을 실시한다면 신뢰성 높은 열차의 통과톤수 측정이 가능할 것으로 판단된다.

두 째, 교량의 단기계측시 FBG 광섬유센서의 적용성을 검토하였으며, 60km/h시에는 -1.07%의 오차율로 충격계수를 산정할 수 있음을 실험적 검증하였다.

세 째, 열차 주행시 차량의 진동계측을 위하여 무선계측시스템을 도입하였으며, 시간이력 및 주파수 분석결과 동일한 응답특성을 확보할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 2006 건설기술혁신사업 “국가 주요시설물 안전관리 네트워크 시범구축 및 운영시스템 개발” 사업으로 이루어진 것으로 건설교통부의 지원에 깊이 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 서울시정개발연구원 (2004), 한강교량 On-Line 안전감시시스템 확립을 위한 실천방안 연구용역, 서울시.
- (2) 한국건설기술연구원 (2003), 광섬유센서를 이용한 교량안전진단 기술개발, 건설교통부.