

광섬유 센서를 이용한 철도차량 대차 안전 확보 기술

1. 서론

최근 한국형 차세대 고속열차가 시속 401.4km를 돌파함으로써, 한국은 프랑스(시속 575km), 중국(486km), 일본(443km)에 이어 세계 4번째 시속 400km급 고속철도 기술 보유국이 되었다. 이와 같은 철도차량의 고속화는 추진체계, 차체 및 대차 등 차량의 개발뿐 아니라, 분기기, 전차선 등 관련 인프라의 성능향상을 동반해야만 하고, 차량 및 시설물의 더욱 치밀한 안전확보 기술을 필요로 한다.

2004년에 개통하여 현재 운행되고 있는 경부고속철도(KTX)는 <표 1>에 나타낸 바와 같이 차축온도 감지장치, 지장물 감지장치, 끌림 감지장치, 기상 감시장치, 열차접근 감시확인장치, 터널 경보장치, 분기기 히팅제어장치,

레일 온도 감지장치, 기계실 출입자 감시설비, 지진 감시설비, 현장설비 기능 감시장치 등의 안전설비를 설치 운영하고 있다 [1].

열차 운행속도 향상에 따라 현재 구축된 안전설비는 차량, 시설물, 작업자 별로 추가 보완이 필요하다. 철도차량의 경우 승객을 수송하기 위한 차체와 차체 하중을 지지하면서 주행을 담당하기 위한 대차, 축전지와 보조 공기압축기, 객실 냉난방 전원 공급장치 등 차량 하부에 장착된 전장품, 그리고 외부전원 수전장치인 집전장치(pantograph) 등으로 구성되는데, 그 중 철도차량 대차는 파손시 열차 탈선을 가져올 수 있는 핵심 구조물로 실시간 안전 확보가 필수적이다. 철도차량 대차의 실시간 안전 감시 장치는 다양한 기술들이 적용되어 개발되고 있으며, 향후 초고속 철도 운영을 위하여 확보되어야 하

특집 1 ■ 2017 OFS-25 국내유치 기념

광섬유 센서를 이용한 철도차량 대차 안전 확보 기술

윤혁진, 김정석\*, 송광용\*\*

표 1. 고속철도 안전설비현황

구분	설비명	설치장소	수량
운전 보안장치	차축온도 감지장치	약 30km 간격	14
	지장물 감지장치	낙석 및 토사붕괴 우려개소	135
	끌림물체 감지장치	연결선 및 기지 진출입구간	11
	기상 감시장치	약 20km 간격	23
시설물 보호장치	레일 온도 감지장치	약 20km 간격	12
	분기기 히팅제어장치	포인트 침단부	163
	터널 경보장치	터널내 작업중 안전대피	51
작업자 보호장치	보수자 선로횡 단장치	보수자 선로횡단	60
	방호스위치		541

\* 한국철도기술연구원 신호통연구본부, \*\* 중앙대학교 물리학과

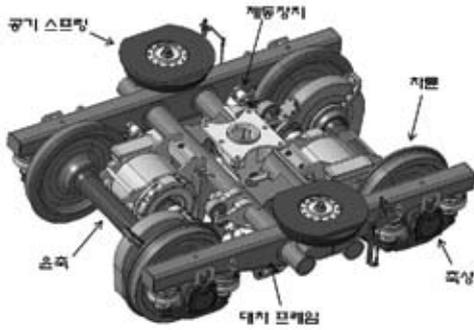
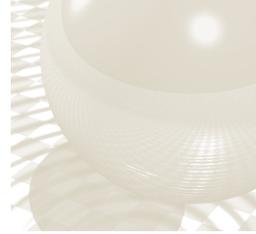


그림 1. 표준 전동차 대차 구조

는 운전보안장치의 핵심기술 중의 하나이다.

실시간 안전 감시 장치에 사용되는 센서들은 여러 종류가 있으나, 특히 광섬유 센서는 유리의 주성분인  $SiO_2$ 로 구성되어 있으므로 전자기파의 영향을 받지 않고, 작동 온도의 범위가 매우 넓으며, 광섬유의 직경이 매우 작고 유연하여 설계자가 원하는 크기의 센서를 쉽게 구성할 수 있으며, 높은 해상도와 다량의 정보 수송 능력이 있다는 장점을 가지고 있어, 기존의 전기식 센서에 비해 철도차량 대차 안전 확보 기술에 적용하기에 유리하다. 본 논문에서는 철도차량 대차의 안전 감시 기술 중, 광섬유 센서가 응용되고 있는 분야에 대해서 개략적으로 정리하였다.

## 2. 철도차량 대차

대차는 철도차량의 차체 아래에 위치하여 주행을 담당하는 부분으로, <그림 1>과 같이대차 프레임과 윤축, 축상, 스프링, 제동장치 등으로 구성되며, 차체하중의 지지, 차체진동의 방지, 조타와 선회 및 구동과 제동의 기능을 수행한다.

1개의 차축(axle)에 2개의 원형 차륜(wheel)이 장착되어 있는 부분을 통틀어 윤축이라고 하며, 축상을 통해 대차 프레임(bogie frame)에 고정된다 [2]. 대차에는 진동을 흡수하여 충격을 완화하고 승차감을 향상시키기 위하여, 대차 프레임과 축상에 연결되어 대차 내부에서의 진동을 잡아주는 1차 현가장치와 대차와 차체간

에 연결되어 충격을 흡수하는 2차 현가장치가 부착되어 있다. 1차 현가장치에는 코일스프링과 수직 오일댐퍼 등이 있으며, 2차 현가장치에는 수직 오일댐퍼, 회전댐퍼, 횡댐퍼, 복렬 코일스프링, 공기 스프링 등이 있다 [3].

자동차에서는 대차프레임에 상당하는 부분이 차체와 함께 섞여있지만 부위로 나타내면 타이어, 서스펜션, 엔진, 브레이크가 여기에 상당한다. 최근의 대차는 속도를 향상시키고 궤도에 대한 부담을 경감시키기 위하여 경량화가 진행되고 있으며, 볼스터가 없는 구조를 채용하여 수평방향의 변위가 큰 공기스프링을 통해 차량 곡선 통과 시 차체와 대차 사이의 회전운동에 의하여 발생하는 수평변화의 변위를 공기스프링이 수용하는 형식의 볼스터리스(bolsterless) 대차가 주류로 되어 있다 [4].

## 3. 대차프레임 건전성 모니터링

대차 프레임은 철도차량 차체와 탑승하고 있는 승객 하중을 지지하는 대차시스템의 핵심 구조물로 25년 이상의 긴 수명이 요구된다. 장시간 운행에 따라 발생하는 차체의 진동과 견인력 및 제동력의 상호작용에 의한 동적 하중 등 다양한 반복하중을 받게 됨에 따라 이러한 대차 프레임은 피로 균열이 발생할 수 있고, 이에 따른 피로파손이 주로 발생한다.

대차 프레임은 차량과 승객하중을 지지하고 축상을 연결하기 위한 사이드 프레임(side frame)과, 대차프레임의 비틀림 하중을 감당하고 제동장치가 체결되는 크로스빔(cross beam)으로 구성되는 <그림 2>와 같은 H 형상을 갖는다.

전동차용 금속재 대차프레임은 일반적으로 SM490A 소재로 내부가 빈 박스형태의 용접구조로 제작되나, 최근에는 유리섬유 복합소재를 적용하여 오토클레이브에



그림 2. 표준전동차 대차프레임과 복합소재 대차프레임

## 광섬유 센서를 이용한 철도차량 대차 안전 확보 기술

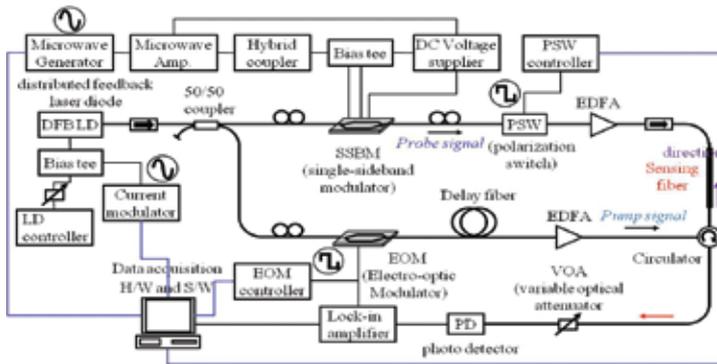


그림 3. BOCDA 시스템 구성도



그림 4. 대차프레임 제작 중 광섬유 삽입과정

서 성형하여 제작함으로써 30% 무게 경량화를 달성하는 기술도 개발되고 있는 추세이다 [5].

사이드 프레임과 크로스 빔의 연결부와 견인장치 및 제동장치 등 대차 구성품 부착을 위한 각종 브라켓의 위치에서 균열이 주로 발생하며, 이 부분들에서 균열이 성장하여 대차 프레임 전체의 기능저하 및 파손을 가져올 수 있으므로 이를 감지할 수 있는 기술이 요구된다. 분포형 광섬유 센서(distributed optical fiber sensor)를 대차 프레임에 부착 또는 삽입하여 건전성을 항시 모니터링하는 무분해 비파괴 검사 기술은 대차 구성품들과 철도차량 차체를 분리하지 않고 대차 프레임의 결합 검출이 가능하므로 실제 현장 적용에 유리할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 측정구간의 임의 선택 기능, 공간해상도 및 샘플링 속도 등을 고려하여, BOCDA(Brillouin Optical Correlation Domain Analysis) 방식의 분포형 광섬유 센서를 선정하였다.

BOCDA 시스템의 기본이 되는 기술은 SOCF(synthesis of optical coherence function)라고 불리는, 광원의 주파수 변조를 이용한 위치 선택 방식이다 [6].

〈그림 3〉의 시스템 구성에 나타난 것처럼, 직접 전류 변조를 통해 광원의 주파수를 사인과 형태로 변조시키고,

변조된 광파를 커플러를 이용해 양 방향으로 나눈 후, SSBM(single-sideband modulator)을 이용한 측파대 발생 방식에 의해  $\Delta\nu$ 의 주파수 offset을 갖는 프로브(probe)광과 펌프(pump)광을 발생시킨다. 두 광파는 측정하고자 하는 광섬유(sensing fiber)를 양방향으로 진행하면서 유도 브릴루앙 산란(stimulated Brillouin scattering)을 발생시킨다. 광원의 전류 변조에 의해 두 광파의 주파수가 같은 사인과 형태로 변하고 있기 때문에 그 주파수 차이에 해당하는 파워 스펙트럼을 시간에 따른 평균을 통해 관찰해 보면, 광섬유의 위치에 따라 주기적으로 변하는 형태로 나타나게 되며, 특정 지점에서만 위치 선택적으로 유도 브릴루앙 산란을 발생시킬 수 있게 된다. 이 방식은 1cm 이하의 공간 분해

능, 1 kHz의 샘플링 속도, 측정 지점의 임의 선택 등의 장점을 가지고 있다.

개발된 분포형 광섬유 센서 시스템은 한국철도기술연구원에서 개발 중인 복합소재 대차프레임의 건전성 모니터링에 우선 적용되었다. 센싱용 광섬유는 〈그림 4〉와 같이 복합소재 대차 프레임 제작시 스킨부 제작 전에 내부에 삽입되었고, 이후 오토클레이브에서 성형하여 대차 프레임과 일체화 되었다.

대차프레임에 〈그림 5〉와 같이 50톤 용량의 액츄에이터 2개와 25톤 용량의 액츄에이터 2개를 이용하여 하중을 가하는 정하중 시험중, 삽입된 광섬유를 이용하여 대차 프레임의 변형률 분포를 모니터링 하였다. 최대 변형률이 발생하는 부분은 사이드 프레임과 크로스 빔의 연결부였으며, 대차 프레임의 형상에 따라서 변형률의 변화를 확인할 수 있었다.

최대하중을 가하는 정하중 시험중 최대 변형률은 허용치 이하였고, 시험 이후 잔류 변형이 발생하지 않아, 대차프레임은 구조적으로 안전함을 확인할 수 있었다. 삽입되어 있는 광섬유를 이용하여 주행 시험중에도 실시간으로 최대 변형률 및 변형률 분포의 변화를 측정할 수 있으며, 이로부터 균열 발생을 탐지할 수 있다.

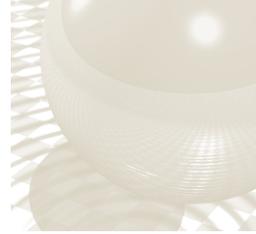


그림 5. 복합소재 대차프레임 건전성 모니터링 시험



그림 9. 차축 건전성 모니터링 시험

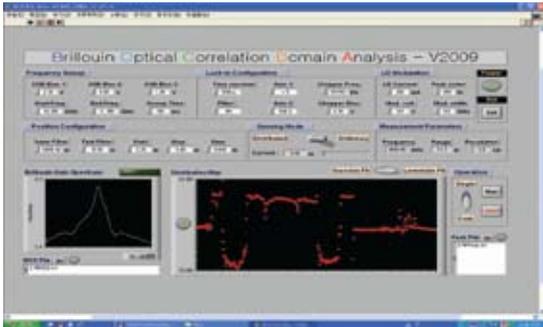


그림 6. 정하중 시험중 대차프레임의 변형을 분포 측정 화면

#### 4. 차축 건전성 모니터링

열차 운행중 차축에 압입되어 있는 차축 베어링이 손상되거나 그리스가 결빙하게 되면, 과도한 마찰로 인하여 베어링부의 온도가 상승하여 차축의 변형이나 손상을 초래하며, 이로 인해 열차의 탈선사고가 일어날 수 있다. 이를 예방하기 위하여 설치된 고속철도 안전설비중 하나인 차축 온도 감지장치는 <그림 7>과 같이 선로변에 설



그림 7. 차축 온도 감지장치 설치 예시

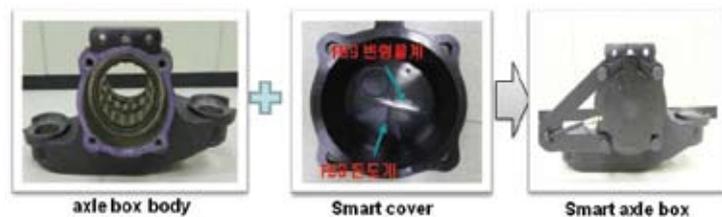
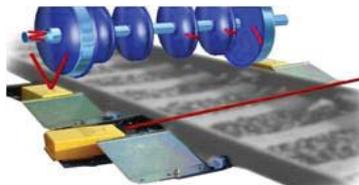


그림 8. 차축 건전성 모니터링 기능을 갖는 축상

치되어 열차 통과시 차축의 온도를 무선으로 측정하여 그 이상유무를 관제실로 통보하고 차축 온도가 80℃ 이상인 경우 단순 알람을 발생하고, 90℃ 이상인 경우 위험 알람을 발생하도록 되어 있다 [7].

그러나, 차축 온도 감지장치의 오동작 또는 온도 미검지가 발생한 경우에도 확인을 위해서 대차의 분해 정비를 수행하여야 하므로, 불필요한 유지보수가 발생된다. 따라서 차상에서 모든 차축의 온도를 열차 운행중 연속적으로 감시할 수 있는 기술이 요구된다. 광섬유 FBG(Fiber Bragg Grating) 센서를 축상에 삽입하여 차축의 온도 및 이상 진동을 항시 모니터링 하는 기술은 차축의 이상상태를 실시간으로 정확하게 판단할 수 있으므로, 선로변에 구축된 차축온도 감지 장치를 상호 보완하여 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

FBG 센서는 광섬유에 새겨진 브래그 격자의 파장 변화량이 가해지는 변형률과 온도에 선형적으로 의존하는 것을 이용하는 센서로 측정치의 절대량 측정에 유리하며,

파장 분할 다중화(wavelength division multiplexing, WDM) 기법을 사용함으로써 동시 다점 측정이 가능하다. 따라서 철도차량 1편성에 취부된 대차 축상에 삽입된 FBG 센서를 모두 연결하여 동시에 실시간으로 차축 발열 및 이상 진동을 모니터링할 수 있다.

FBG 변형률 센서와 온도 센서가 <그림 8>과 같이 축상 커버 내부에 음각되어 설계된 위치에 삽입되었고, 축상과 체결되었다.

FBG 센서가 삽입되어 제작된 축상은 <그림 9>의 복합소재 대차의 주행

## 광섬유 센서를 이용한 철도차량 대차 안전 확보 기술

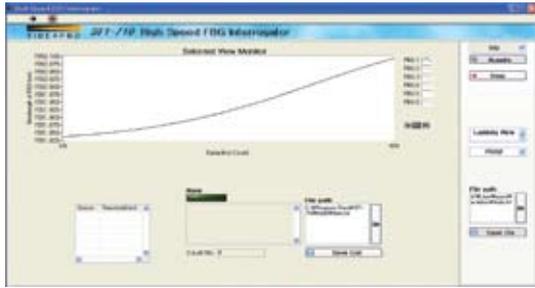


그림 10. 주행시험중 FBG 센서의 온도 및 진동 측정 결과

시험에 우선 적용되었으며, 온도 및 진동 측정을 위하여 100kHz까지 샘플링이 가능한 고속 FBG 로거(SFI-710, Fiberpro Co.)가 사용되었다.

주행시험중 삽입된 FBG 센서를 이용하여 차축 발열 및 진동을 실시간으로 모니터링하였다. 이상 진동은 감지되지 않았고, 차축의 최고온도는  $39 \pm 0.1^\circ\text{C}$  이었다.

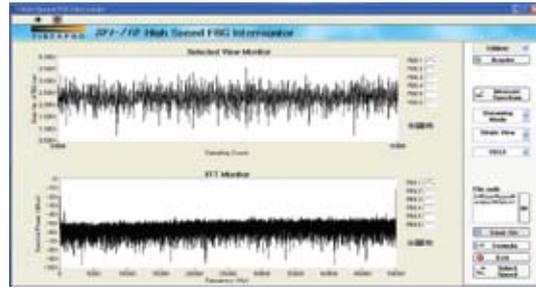
측상에 삽입되어 있는 FBG 센서를 이용하여 운행환경에서도 실시간으로 윤축에서 발생하는 온도 및 이상진동을 감지할 수 있으며, 이로부터 측상베어링 파손 및 차축 이상 등을 탐지할 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 철도차량의 안전을 확보하기 위하여 철도차량 대차에 적용되는 광섬유 센서 기술들을 개략적으로 소개하였다. 본 기술들은 현재 운행중인 전동차용 대차뿐만 아니라, 국내에서 개발중인 복합소재 대차에도 확대 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 이 외에도 철도 사면, 교량, 터널 등과 같은 철도 시설물, 레일 및 노반 등과 같은 궤도 구조물 등에도 다양한 광섬유 센서 기술들이 개발되어 적용되고 있다. 철도분야의 광섬유 센서의 적용 범위는 점차 넓어지고 있으며, 철도 교통의 안전확보에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] 이강미, 백종현, 신덕호, “열차운행속도 향상에 따른 고속철도 안전설비 개량항목 도출” 대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집, pp. 1796-1798 (2010)
- [2] 양희주, 임용규, 김진태, 오형식, 오택렬, “1축 대차의 개발” 한국철도학회 춘계학술대회 논문집 pp. 125-134 (2000).
- [3] 이원상, “차세대 고속전철 대차기술” 기계저널 Vol. 50, No. 5,



- pp.48-51 (2010).
- [4] 서사범, 철도공학, 북갤러리, pp. 549-550 (2006).
  - [5] J.S. Kim, K.B. Shin, H.J. Yoon and W.G. Lee, “Durability evaluation of a composite bogie frame with bow-shaped side beams”, Journal of Mechanical Science and Technology, vol.26, no.2, pp.531-536 (2012).
  - [6] K. Hotate and T. Hasegawa, “Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique-proposal, experiment and simulation”, IEICE Transactions on Electronics, vol.83, no.3, pp.405-412 (2000).
  - [7] 윤차중, 조용기, 박상운, 김호순, “유,무선 온도센서를 활용한 KTX 차축온도 측정 비교 분석”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집 pp. 624-629 (2010).

### 약 력

#### 윤혁진



- 2006년 - 현재 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2002년 - 2006년 KAIST 기계공학과 항공우주공학전공, 박사
- 2000년 - 2002년 KAIST 기계공학과 항공우주공학전공, 석사

#### 김정석



- 2003년 - 현재 한국철도기술연구원 책임연구원
- 2000년 - 2003년 LG전선 기계연구소, 선임연구원
- 1994년 3월 - 1999년 8월 KAIST 기계공학과 항공우주공학전공, 박사
- 1992년 3월 - 1994년 2월 KAIST 기계공학과 항공우주공학전공, 석사

#### 송광용



- 2011년 - 현재 중앙대학교 물리학과 부교수
- 2007년 - 2010년 중앙대학교 물리학과 조교수
- 2005년 - 2006년 동경대학교 전자공학과, 연구원
- 2003년 - 2004년 스위스 연방 공대, 연구원
- 1998년 - 2003년 KAIST 물리학과, 박사
- 1996년 - 1998년 KAIST 물리학과, 석사