철도터널 진동 모니터링을 위한 광섬유 가속도계 개발

Development of FBG Accelerometer for Railway Tunnel Vibration

이수형[†] · 신민호¹ · 김현기¹ · 이규완²

Su Hyung Lee · Min Ho Shin · Hyun Ki Kim · Kyu Wan Lee

Abstract For the safety management of tunnel, effective measurements should be continuously carried out. Most of sensors currently being applied for tunnels measure only the local status, thus many of them are needed to monitor an entire tunnel. For the railway tunnel where trains of same conditions are regularly operated, dynamic responses of tunnel structure to train operations can be a good index to estimate the deformation of tunnel structure in wide area. Meanwhile, the electromagnetic interference caused by overhead centenary in railway tunnel obstructs the use of electric-based sensors. In this study a brand new accelerometer using FBG optical fiber sensors is developed to solve these problems. Sensitivity and capacity of the accelerometer are enhanced with effective structural design of its components and verified with laboratory tests. A case history where the developed accelerometers were applied to a safety monitoring system of a high-speed train tunnel is presented. The performances of the developed accelerometers are validated from the measured acceleration data.

Keywords :Tunnel, Lining, Vibration, Monitoring, FBG, Optical fiber, Accelerometer

초 록 터널의 안전관리를 위해서는 효과적이고 지속적인 계측이 필요하다. 현재 적용되고 있는 대부분의 계측센서로는 터널의 국부적인 상태만을 파악할 수 있으므로 전체 터널의 안전상태를 파악하기 위해서는 다수의 설치가 필요하다. 철도터널의 경우 일정한 조건의 열차운행이 정기적으로 이루어지므로 터널구조물에 발생하는 진동을 지속적으로 관측하여 분석하면 상대적으로 넓은 범위의 영역에 대하여 터널 손상을 효과적으로 예측할 수 있다. 한편 철도터널 내에는 고전압으로 인한 전자기장의 간섭이 있으므로, 이를 배제할 수 있는 계측센서의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 광섬유격자센서를 이용한 가속도계를 개발하였다. 기존 터널의 진동계측 결과를 검토하여 철도터널 진동 계측에 적합한 가속도계의 사양을 결정하였다. 민감도와 측정범위의 향상을 위하여 새로운 구조를 적용한 가속도계를 개발하였으며 실내시험을 통해 그 성능을 검증하였다. 개발된 광섬유 가속도계를 적용하여 고속철도 터널의 상시 진동모니터링 시스템을 구축한 사례를 소개하였으며, 열차운행에 의하여 발생하는 진동 계측 결과를 통해 개발된 가속도계의 유효성을 제시하였다.

주요어 : 터널, 라이닝, 진동, 모니터링, 광섬유격자센서, 가속도계

1. 서 론

터널의 효율적인 안전관리를 위해서는 구조물의 상태를 전반적으로 평가할 수 있는 계측 방안을 적용하는 것이 필요하다. 현재 터널에 적용되고 있는 일반적인 계측센서는 터널의 국부적인 상태만을 측정하므로, 터널 전체의 안전성을 평가하기 위해서는 다수의 설치가 필요하다. 따라서 넓은 영역의 터널 안전성을 효과적으로 평가할 수 있는 새로운 계측 방안의 적용이 요구되고 있다.

일정한 동적 하중에 대한 구조물의 동적 반응을 지속적으로 관측하면, 그 변화로부터 구조물의 손상을 예측할 수 있다. 철도 터널의 경우 일정한 조건의 열차가 정기적으로 운행

하므로 열차 운행에 따른 터널라이닝의 진동을 주기적으로 측정하고 그 추이를 분석하면, 터널 구조물 상태 및 배면 지반조건의 변화에 대한 예측이 가능할 것으로 기대된다. Vanicek et al. [1]은 체코의 지하철 터널에 대하여 열차 운행에 의하여 발생한 진동을 지속적으로 관측하여 분석함으로써 손상 영역을 예측할 수 있다는 결과를 제시하였다. 본 연구에서는 이러한 열차운행에 따른 진동 모니터링을 통해 터널의 안전관리를 수행하기 위한 방안의 일환으로 광섬유격자(FBG, Fiber Bragg Grating)센서를 적용한 가속도계를 개발하였다.

철도터널의 안전관리를 위하여 설치되는 계측시스템이 일반적으로 갖추어야 할 조건은, 1) 선로상 고전압 가선의 전자기적인 간섭에 의한 계측의 불확실성을 배제할 수 있어야 하고, 2) 열차가 지속적으로 운행되므로 한정된 야간 열차 차단 시간에 빠른 설치가 가능해야 하며, 3) 운용 중인 터널의 경우 터널 구조체의 손상을 최소화 하면서 쉽게 설치가 가능하여야 한다. 이러한 철도터널의 특성에 적합한 계측방법으로 광섬유 가속도계를 이용하여 열차운행에 의해 발

[†]교신저자 : 한국철도기술연구원 신교통연구본부
E-mail : geonlee@krii.re.kr

¹한국철도기술연구원 신교통연구본부

²주카이센

생하는 진동을 측정하는 방안이 효율적인 것으로 판단하였다. 본 연구에서는 효율적인 구조 설계를 통해 열차운행에 의한 터널구조물 진동 측정이 가능한 민감도와 측정한계를 구비하고 동시에 전자기장 간섭을 완전히 배제할 수 있는 새로운 광섬유가속도계를 개발하였다. 기존 경부고속선 1단계 구간간의 열차운행에 따른 진동 계측결과를 토대로 철도터널 진동 성능평가에 적합한 가속도계의 사양을 결정하였다. 가속도계 구성품의 배치구조를 효과적으로 개선함으로써 결정된 사양에 적합한 고성능 광섬유 가속도계를 발명하고 실내 시험을 통해 그 성능을 검증하였다. 또한 개발된 시제품을 실제 고속철도 터널에 설치하여 터널진동 상시 모니터링 시스템을 구축한 사례와 가속도 계측결과를 함께 제시함으로써 개발 가속도계의 유효성을 규명하였다.

2. 본 론

2.1 광섬유격자센서 가속도계의 개발

2.1.1 열차 운행에 따른 터널 구조물의 진동

Table 1은 Korea Railroad Research Institute [2]에서 제시한 경부고속철도 1단계 구간인 콘크리트궤도와 자갈도상궤도가 부설된 터널에서 KTX 주행 시 구조물(침목, 슬래브, 라이닝)에 발생하는 진동을 측정된 결과이다. 자갈도상궤도의 경우 콘크리트궤도에 비해 상대적으로 침목의 거동이 자유롭기 때문에 국부적으로 진동이 평균 25dB 크게 발생하였다. 콘크리트궤도의 경우는 침목과 슬래브가 일체화 되어 있어 두 구조물의 진동형상이 매우 유사한 것으로 나타났다. 라이닝의 경우는 콘크리트 궤도가 부설된 터널이 자갈도상궤도가 부설된 터널에 비해 5dB 정도 진동이 작게 발생하는 것을 알 수 있으며, 콘크리트궤도의 경우, 63~200Hz, 자갈도상 궤도의 경우, 50~315Hz대역에서 50dB 이상의 진동이 측정된 것으로 보고 되었다. 따라서 이러한 열차운행을 가진원으로 하여 발생하는 라이닝의 진동 특성을 지속적으로 관측한다면, 균열, 변형, 배면공극 등으로 인한 터널의 구조적 특성 변화를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

2.1.2 개발성능의 결정

철도터널의 계측시스템을 구성하면서 계측장비의 선정을 두고 가장 중요하게 고려해야 하는 점은 22,000볼트의 고전압에 의한 전자기장의 형성에도 불구하고 계측의 신뢰성을 확보해야 한다는 것이다. 일반적으로 지하구조물을 포함한

Table 2 Specifications of accelerometers using FBG optical fiber sensors

Manufacturer	Specifications
Micron Optics	Sensitivity = 16pm/g, Resolution = 0.0625g
gavea sensors	Sensitivity=22.32pm/g, Resolution=0.0448g
東京側振	Sensitivity=597pm/g, Resolution=0.00167g

토목구조물에는 전기식 또는 진동현식 계측기기를 이용한 계측이 널리 적용되고 있다. 그러나 전기식 및 진동현식 계측기기는 구조물의 잔존기간 동안 전자식 변형률계와 연결선 사이의 부식에 의한 결함이 생길 수 있는 단점이 있다. 그리고 각 센서에 한 개의 연결선이 필요하게 되어, 자동화 계측 시스템과 센서간의 연결선이 길어지게 되면 전자기적 특성에 따라 정확한 계측 데이터를 얻을 수 없게 된다. 이에 비하여, 광섬유격자(FBG, Fiber Bragg Grating) 센서는 재질이 석영(유리)이므로 재료의 특성상 부식이 발생하지 않는 장점이 있다. 그리고 광(빛)을 이용한 계측 방식이므로 전자기파에 의한 영향을 받지 않으며, 낙뢰 및 간접뢰에 의한 센서의 손상이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 광섬유격자센서는 빛의 파장을 이용한 신호처리로 전자기파나 기타 이상 전류 등과 같은 외력에 의한 영향을 받지 않으므로 안정적인 신호를 받을 수 있다. 광섬유격자센서는 고유파장 변화를 측정하기 때문에 시스템에 전원이 일시적으로 중단이 되거나, 시스템 고장이 발생할 경우에도 센서에 별도의 보정 작업이 필요하지 않고, 연계된 데이터의 축적이 가능한 장점을 가지고 있다. 따라서 철도터널과 같이 계측 목적상 불가피하게 전기선로와 가깝게 계측기를 설치해야 하는 경우 광섬유 센서를 적용하는 것이 적합하다.

Table 2는 현재 시판되고 있는 FBG 센서를 적용한 광섬유가속도계의 종류이다. 미국 Micron optics사와 유럽의 gavea sensor에서 개발한 광섬유가속도계의 경우는 측정 민감도가 각각 16pm/g와 22.32pm/g로 일반 전기식 가속도계에 비하여 정밀도가 현저히 떨어지는 단점이 있다. 일본 東京側振에서 개발한 광섬유가속도계의 측정 민감도는 597pm/g로 터널 진동 측정에 적용이 가능할 것으로 평가되나, 가격이 유사한 사양의 기존 전기식가속도계의 5배 이상으로 터널의 안전관리를 위해서 적용하기에는 경제성이 떨어지는 단점이 있는 것으로 조사되었다.

따라서 본 연구에서는 터널의 안전관리 목적의 진동 성능

Table 1 Vibration of tunnel components induced by KTX operation (KRRI [2])

Tunnel	Track type	Components	Vibration Level (dB)			Average (dB)
A	Concrete	Sleeper	94.6	-	-	94.6
		Slab	95.0	-	-	95.0
		Lining	65.4	-	-	65.4
B	Ballast	Lining	64.8	67.5	64.1	65.5
C	Ballast	Sleeper	119.8	119.4	119.7	119.6
		Lining	70.4	69.5	69.3	69.7

평가에 적합한 고사양의 광섬유가속도계를 경제적으로 개발하고자 하였다. Fig. 1은 콘크리트케도가 설치된 터널라이닝에서 열차운행에 따른 가속도를 기존 전기식가속도계를 이용하여 측정한 결과(Korea Railroad Research Institute [2])로 이를 고려하여 개발사양을 결정하였다. 또한 일반적인 토목구조물에 적용되는 가속도계와 동등 수준인 1,000pm/g의 목표 민감도를 설정하고, 측정한계는 기존 광섬유가속도계의 개발수준을 고려하여 $\pm 2g$ 로 설정하였다.

2.1.3 광섬유 가속도계의 원리 및 성능개선

광섬유센서를 적용한 가속도계의 가장 일반적인 구조는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 FBG 센서가 일체로 부착된 캔틸레버에 매스를 부착하여, 매스의 진동으로 인한 캔틸레버의 변형을 통해 가속도를 측정하는 방식이다.

이러한 기존의 광섬유 가속도계 구조는 캔틸레버의 강성과 매스에 따라서 민감도가 결정된다. 따라서 측정 민감도를 높이기 위해서는 매스 중량을 높이거나 캔틸레버의 강성을 낮추는 두 가지 방안이 있을 수 있다. 그러나, 매스 중량을 높이기 위해서는 센서 크기가 커지는 단점이 있으며 캔

텔레비 감성을 낮추기 위해서는 센서의 측정범위, 재현성, 충격강도 등 많은 사항들을 고려해야 한다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 토목구조물에 설치하 용이하도록 크기가 크지 않으면서도 민감도를 높일 수 있는 방안으로 광섬유 가속도계의 구조를 변경하였다.

일반적인 보 구조물에 발생하는 응력은 다음의 식에 의하여 결정된다.

$$f = \frac{My}{I} \quad (1)$$

여기서, f : 응력

M : 작용모멘트(pL)

 p : 하중(또는 질량)

L : 고정단에서 매스까지의 거리

I : 단면2차모멘트,

 ν : 중립축으로부터의 거리

동일한 캔틸레버, 매스 구조의 경우, 식(1)에 의하여 동일한 가속도 또는 경사각 발생 시 단면 2차모멘트 I 와 작용모멘트 M_0 이 동일하기 때문에, 중립축으로부터의 거리 y 에 따라서 측정 정밀도가 변화한다. 아래의 Fig. 3과 같이 기존 가속도계의 경우에는 캔틸레버 바로 위에 FBG 광섬유 변형률 센서를 부착하였으나, 개발 가속도계에는 정밀도 향상을 위해서는 y 만큼 떨어진 위치에 FBG 광섬유 변형률 센서 양단을 고착제에 의하여 부착 고정함으로써 동일한 매스 및 캔틸레버 구조에 대하여 정밀도를 크게 향상시킬 수 있도록 고안하였다. 예를 들면 기존의 캔틸레버와 매스로 이루어진 시제품의 구조로 제작 시 측정감도(Sensitivity)가 10pm/g라고 가정한다면, Fig. 3과 같이 y 를 10배로 증가시키면 동일한 구조에서 특별한 노력 없이 측정감도가 10배인 100pm/g가 된다. 본 연구에서는 이러한 원리를 이용하여 FBG 광섬유 변형률 센서의 부착위치 변경을 통하여 정밀도를 향상시킨 가속도를 개발하였다.

Fig. 2 Structure of FBG accelerometer using cantilever & mass

Fig. 3 Sensitivity enhancing scheme for the developed accelerometer

2.1.4 개발 가속도계의 검증

Fig. 1의 콘크리트케도가 설치된 터널의 라이닝에서 측정된 열차운행에 의한 진동 측정 결과에 의하면, 터널 라이닝의 진동 측정을 위해서는 가속도의 분해능이 $0.0005g$ 이하로 개발되어야 하는 것으로 판단되었다. 상기 목적 사양을 만족하기 위한 최적 설계 후 시작품을 제작하여 $1g$ 에 대한 측정 민감도와 가진에 의한 측정범위를 실험적으로 검증하였다. Fig. 4는 개발 가속도계에 대하여 $1g$ 의 가속도를 가한 경우 측정된 파장이다. 3회의 동일한 검증시험 결과 $1g$ 의 가속도에 대하여 $1,400pm$ 의 일정한 파장이 나타났으며, $1,000pm/g$ 로 설정한 민감도 요구 성능을 만족하였다. 또한

Fig. 4 Wavelength responses of the developed accelerometer to $1g$ acceleration

pre-strain 조절에 의하여 가속도 측정범위도 $\pm 2g$ 이내로 요구 성능이 만족되었다.

2.2 개발 가속도계의 현장 적용

2.2.1 가속도계 설치 철도터널 개요

개발된 가속도계는 경부고속선 2단계 구간 복안터널에 설치되었다. 대상터널은 경부고속철도 2단계 구간 중 경주~언양 사이에 위치한 연장 $3.32km$ 의 복선터널로, 경부고속도로와 국도 35호선 하부를 통과한다. 또한 이 구간은 양산단층이 위치하는 곳으로서 복안터널은 양산단층을 사교하고 있다(Fig. 5).

복안터널 설계를 위한 기존 조사결과(Korea Hi-speed train Authorization [4])에 의하면 터널구간에서 양산단층의 폭은 $50\sim 150m$ 이고 단층의 중앙부에 단층비지대가 위치하고 그 양측에 단층파쇄대가 위치한다. 해당 터널은 시공 중 균열로 공사가 전면 중단되었던 이력이 있으며, 단층대를 보강하기 위하여 터널 지상부에는 다수의 마이크로파일을 설치한 상태이다. 특히 터널 구간 상부에는 주요 고속도로 및 국도가 지나고 있으므로 향후 안전성에 대한 안전관리계획이 요구되고 있다. 개발 가속도계는 안전관리 우선순위가 가장 높다고 평가된, 터널과 경부고속도로가 교차하는 단면 1개소에 설치되었다. 해당터널은 2010년 11월 개통되었으며 현재 고속열차가 운행 중에 있다.

2.2.2 가속도계와 계측시스템의 설치

개발된 2개의 가속도계를 복안터널 해당단면의 상하선 스프링라인에 각각 에폭시를 이용하여 부착하고 보호함을 설치하였다(Fig. 6). 시스템 분전함에는 광섬유데이터수집장치(인터로게이터, Interrogator)와 계측데이터의 저장 및 전송을 위한 PC를 함께 설치하였다(Fig. 7). 광섬유계측데이터 수집장치로는 Micron Optics의 SM130 모델이 적용되었다. 이 장비는 FBG 타입의 광센서로부터 측정된 데이터를 저장할 수 있으며, 원격 제어가 가능토록 RS-232 시리얼 포트가 구비되어 CDMA 모뎀들을 통하여 원격으로 제어 및 측정이 가능하다. 해당 터널은 연장이 길기 때문에 유선 네트워크를 구성하기 어려운 상황이다. 가속도 측정결과는 동적자료로 저장 및 전송량이 매우 크기 때문에 무선으로 데이터를 전송하는 것이 불가능하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 현장에 PC를 설치하여 일정시간 데이터를 저장하고 있

Fig. 5 Location and geological condition of Bokan tunnel (C.S. Lee & H. Lee [3])

Fig. 6 Installation of the developed accelerometer

Fig. 8 Monitoring program for Bokan tunnel

Fig. 7 Data acquisition system

다가 1시간 단위로 CDMA 모뎀을 통해 축적된 데이터를 전송하는 양방향 제어 프로그램을 개발하였다. Fig. 8은 개발된 모니터링 프로그램을 나타내며, 인터넷을 통하여 실시간

으로 열차운행에 따른 터널라이닝 진동을 확인할 수 있다.

2.2.3 계측결과

Fig. 9는 KTX 고속열차 1편성의 운행에 의하여 발생한 가속도 계측결과를 나타낸다. 계측의 빈도는 인터로게이터의 최대 계측가능 빈도인 100Hz로 설정되었다. Fig. 9에 나타난 진동형태는 Fig. 1에 나타난 기존의 결과와 상당한 차이를 나타내고 있으며, 10배 정도 큰 가속도가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 경부고속선 1단계 구간과 2단계 구간에 각각 적용된 콘크리트케도의 형식, 터널 단면, 가속도계 설치 위치, 배면지반의 강성조건 등의 차이로 인한 것으로 판단된다. 가속도 측정결과를 통해 본 연구에서 개발된 민감도 0.0005g, 측정한계 $\pm 2g$ 사양의 광섬유 가속도계가 고속열차 운행에 따른 터널 라이닝의 진동을 합리적으로 측정할 수 있는 것으로 평가되었다.

Fig. 9 Accelerations of tunnel lining generated by train operation

Fig. 10 Peak acceleration of tunnel lining generated by train operation

Fig. 10은 정상적인 계측이 이루어지기 시작한 2010년12월17일부터 2011년3월17일까지 3개월간 측정된 터널 라이닝의 침두가속도를 나타낸다. 열차운행에 의하여 라이닝에 발생한 침두가속도는 최대 0.68g로 나타났으며, 혹한기인 1월 중순에서 2월 중순까지 비교적 크게 발생하다가, 기온이 상승하는 3월에 다소 감소하는 경향이 나타났다. 그러나 터널 및 계측시스템의 본격적인 운용이 4개월 밖에 진행되지 않았기 때문에 현재까지 열차운행에 따라 발생하는 최대가속도에 대한 특정 경향을 논할 수 있는 조건은 아닌 것으로 판단되며, 향후 1년 이상의 계측결과가 축적되어 분석되면, 열차운행에 따른 최대가속도의 변화로 터널 라이닝의 균열, 변형 등의 특성 변화를 감지할 수 있는 시스템이 완성될 수 있을 것으로 기대한다.

3. 결 론

본 논문에서는 열차운행에 따른 철도터널의 진동측정을 위하여, 광섬유격자센서를 이용한 가속도계를 개발하고 이를 실제 현장에 적용한 사례를 소개하였다.

(1) 철도터널에 발생하는 고전압에 의한 전자기장 간섭을 배제하면서 열차운행에 의한 터널라이닝의 진동을 측정할 수 있는 방안으로 광섬유격자센서를 적용한 가속도계를 개발하였으며, 구성품의 효과적인 배치를 통해 기존에 비해 민감도와 측정범위를 향상시켰다.

(2) 개발 가속도계를 실제 운행중인 고속철도 터널에 설치하여 열차운행에 따른 터널진동 상시모니터링 시스템에 성공적으로 적용하였다.

(3) 계측 가속도 결과를 분석한 결과 개발 가속도계의 성능은 열차운행에 따른 터널 진동을 적절하게 측정할 수 있는 것으로 평가되었다.

향후 개발 가속도계를 이용하여 열차운행에 따른 터널진동 계측을 지속적으로 수행하고, 그 결과를 분석하여 터널 구조물의 손상 예측에 대한 유효성을 검증 한다면, 철도터널에 대한 보다 합리적이고 효율적인 안전관리가 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] I. Vanicek, M. Vanicek, J. Zalesky (2009) Monitoring of Tunnel Lining Deformation and Deterioration, Proc. of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt, pp. 2111-2116
- [2] Korea Railroad Research Institute (2004) Advisory Services on Upgrading of the Existing Railway Facilities and Electrification of the Conventional Lines, Korea Railroad Research Institute.
- [3] C.S. Lee, H. Lee (2009) Hydrothermal Alteration and Engineering Characteristics in the Bokan Tunnel Area passing through the Yangsan Fault, Journal of Mineralogy Society of Korea, 22(1), pp. 13-22
- [4] Korea Hi-speed Train Authorization (2003) Geotechnical Investigation Report of Gyeongbu Hi-speed Line No.12-4 Site, Korea Hi-speed Train Authorization
- [5] D.Y. Sung, Y.G. Park, J.Y. Choi, S.I. Kim (2010) The Experimental Study on the Effect of Track System on the Integral Behavior of Railway Bridge, Journal of the Korean Society for Railway, 13(2), pp. 131-250.

접수일(2011년 3월 28일), 수정일(2011년 7월 8일),
게재확정일(2011년 8월 13일)