

광섬유격자센서 내장 FRP스트립을 이용한 철도터널 라이닝 변형 계측 Tunnel lining deformation measurement using a FBG embedded FRP strip

이수형† 신민호* 김현기* 이규완**
Su-Hyung Lee Min-Ho Shin Hyun-Ki Kim Kyu-Wan Lee

ABSTRACT

A new sensor package was applied to the safety monitoring of railway tunnel. FBG (Fiber Bragg Grating) optical fiber sensors are embedded in a FRP (Fiber Reinforced Plastic) strip to measure the deformation of tunnel lining. The FRP strip can be easily attached to the tunnel lining in a short time without any damage to the structure. This paper introduce the characteristics of the sensor system and a case story. The sensor system was installed successfully in Bokan tunnel of Gyeongbu high speed line to monitor the deformation of tunnel lining in a real time.

1. 서 론

일반적으로 터널은 지층의 형태가 다양하고 분포가 일정하지 않은 지중에 건설되므로 시공단계부터 시공 안전성, 지반조건, 지보부재의 응력거동 및 안정성 등을 확보하기 위한 계측관리를 실시하여야 한다. 그러나 현재 대부분의 철도터널 여건에서는 이러한 시공 초기부터의 계측관리가 거의 이루어지지 않고 있는 상황이다. 따라서 철도터널의 안전성 판단을 위하여 열차 운용 중 변형에 대한 계측을 수행하고 있다. 따라서 철도터널의 변형을 상시 계측하는 것이 현재로서는 가장 적절한 안전관리 방안이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 철도터널 라이닝의 변형을 상시 계측할 수 있는 시스템으로써 FBG 센서를 FRP 스트립에 부착한 계측 시스템을 소개한다. 개발된 시스템은 기존 시스템과 달리 이미 시공된 터널의 라이닝에 추가적인 손상 없이 직접 부착하여 설치가 가능하므로 현재 사용 중인 철도터널의 위험단면에 대한 변형 계측 방안으로 적합하다. 본 논문에서는 이 시스템의 특징과 경부고속선 복안터널에 대한 시험 구축 사례를 소개한다.

2. FRP 스트립 광섬유격자센서 시스템

철도터널의 내공변위 계측시스템을 구성하면서 계측장비의 선정을 두고 가장 중요하게 고려해야 하는 점은 내구성 및 정밀도, 측정범위, 분해능, 노이즈의 영향 등이며, 이는 계측의 목적과 결과에 직접적으로 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다. 철도의 특성상 22,000 볼트의 고전압에 의한 전자기장의 형성에도 불구하고 데이터의 신뢰성을 확보해야 하므로 계측 목적상 불가피하게 전기선로와 가깝게 설치해야 하는 경우 광섬유 센서를 적용하는 것이 적합하다. 일반적으로 지하구조물을 포함한 토목 구조물의 계측 방법은 전기식 또는 진동현식 계측기기를 이용한 수동계측과 자동계측이 널리 사용되고 있다. 그러나 수동계측의 경우 상당한 시간과 인력을 필요로 하게 되어 매우 비경제적이다. 또한 전기식 및 진동현식 계측기기를 이용한 자동계측의 경우에도 지하구조물의 잔존기간동안 전자식 스트레인 게이지와 리드선 사이에 부식에 의한 결함이 생길 수 있는 단점이 있다. 그리고 각기 센서에 한 개의 리드선

† 교신저자, 한국철도기술연구원, 무가선트램연구단
E-mail : geoxlee@krrri.re.kr
* 한국철도기술연구원, 철도구조연구실
** (주)카이센, 대표이사, E-mail : ceo@kaisen.co.kr

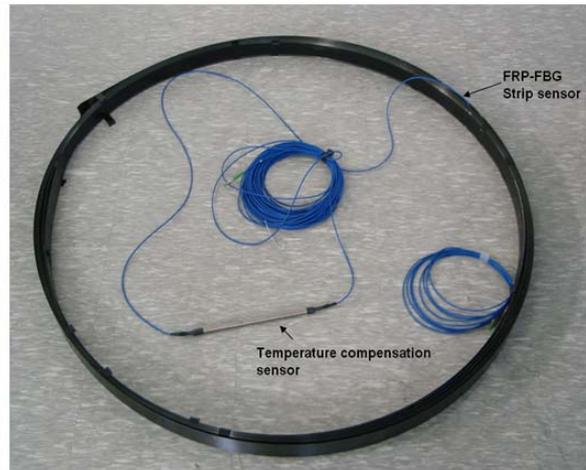
이 필요하게 되어, 자동화 계측 시스템과의 센서간의 연결 리드선이 길어지게 되면 전자기적 특성에 따라 정확한 계측 데이터를 얻을 수 없게 된다. 이에 비하여, 광섬유격자(FBG, Fiber Bragg Grating) 센서는 재질이 석영(유리)이므로 재료의 특성상 부식이 발생하지 않는 장점이 있다. 그리고 광(빛)을 이용한 계측 방식이므로 전자기파에 의한 영향을 받지 않으며, 낙뢰 및 간접뢰에 의한 센서의 손상이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 광섬유격자 센서는 빛의 파장을 이용한 신호처리로 전자기파나 기타 이상 전류 등과 같은 외력에 의한 영향을 받지 않으므로 안정적인 데이터 신호를 받을 수 있다. 광섬유격자 센서는 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.

본 연구에서는 일련의 광섬유격자 센서를 FRP(Fiber Reinforced Plastic) 스트립에 부착한 센서 패키지를 개발하였다. 제작된 센서 패키지는 일체화 되어 있으므로 쉽게 터널 전단면에 부착이 가능하며, 터널 라이닝과 동일한 형상으로 일체 거동을 하도록 제작되었다(그림 1). 곡률-처짐 및 변형률과의 상관성을 이용하면 측정변형률에 따른 터널 라이닝의 전체적인 곡률 및 변위량을 예측할 수 있다. 따라서 터널에 적용 시 연단거리 y 를 파악하는 것이 가장 중요한 요소이다. 이를 위하여 라이닝 두께를 기준으로 연단거리를 y 를 추정하는 방법과 FRP-FBG 스트립 센서를 압축-인장부에 2단으로 설치하여 연단거리를 y 를 측정하는 두 가지 방법으로 현장 적용이 가능하다.

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \tag{1}$$

$$\epsilon_x = -\frac{y}{\rho} = -\kappa y \tag{2}$$

여기서, κ, ρ : 곡률 및 곡률반경
 x : 거리
 v : 처짐곡선
 M : 모멘트
 EI : 휨강성
 ϵ : 종방향 변형률
 y : 연단거리



(a) FRP 스트립에 일체화된 광섬유격자 센서

(b) 16개 광섬유격자 센서 내장 패키지

그림 1. 광섬유격자 센서를 내장한 FRP 스트립 센서

개발된 시스템은 지그 설치 등을 위한 추가적인 천공작업 없이 「표면처리→프라이머 도포→탄소섬유 에폭시 레진→탄소섬유판 고정설치 및 마무리」 등의 일반적인 설치 공정에 의하여 콘크리트 표면에 부착 고정이 가능하다. 따라서 터널 전단면에 대하여 일체 시공이 가능하기 때문에, 센서와 센서 사이의 연결을 위한 광융착 또는 커넥터 작업 등의 숙련도와 인력이 많이 소요되는 공정을 획기적으로 개선하여 현장에서 설치가 매우 쉽고 비전문가에 의해서도 적용이 가능하다. 또한 공장에서 센서의 제작 및 품질관리가 이루어져 현장에서 발생될 있는 품질 오차 발생 가능성을 최소화하였으며, 기존 센서에 비하여 제작 단가 및 설치비용이 저렴하다. 그리고 탄소섬유는 반영구적인 재료이기 때문에 장기적인 내구성이 우수하고, 콘크리트에 부착이 용이한 장점이 있다.

개발된 시스템의 검증을 위하여 UTM을 이용하여 인장시험을 실시하였다(그림 2). 5,000kgf 까지 인장하중 변화에 따른 광섬유격자센서의 파장을 측정하였으며, 하중-응답 특성은 그림 3과 같다. 실험결과 완벽한 선형적인 응답특성을 나타내어 터널 라이닝 변형 측정에 적합한 것으로 평가되었다.



그림 2. 광섬유격자센서 내장 FRP 스트립의 인장 재하시험

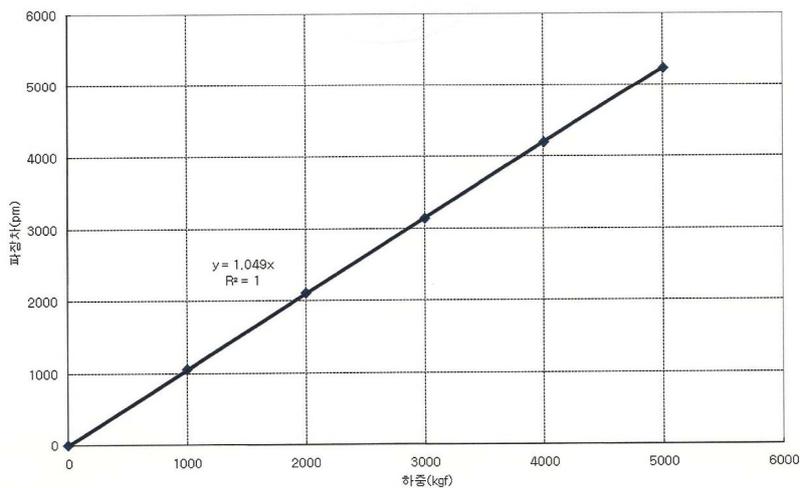


그림 3. 인장 재하시험 결과로 나타난 하중-파장 응답 특성

3. 현장 적용 사례

개발된 시스템은 경부고속선 2단계 구간인 복안터널에 적용되었다. 대상터널은 경부고속철도 2단계 구간 중 경주~언양 사이에 위치한 연장 3.32km의 복선터널이다. 대상터널은 경부고속도로와 국도 35호선 하부를 통과하도록 되어 있으며, 이 구간은 양산단층이 위치하는 곳으로서 복안터널은 양산단층을 사교하여 통과하도록 계획되어 있다(그림 4).

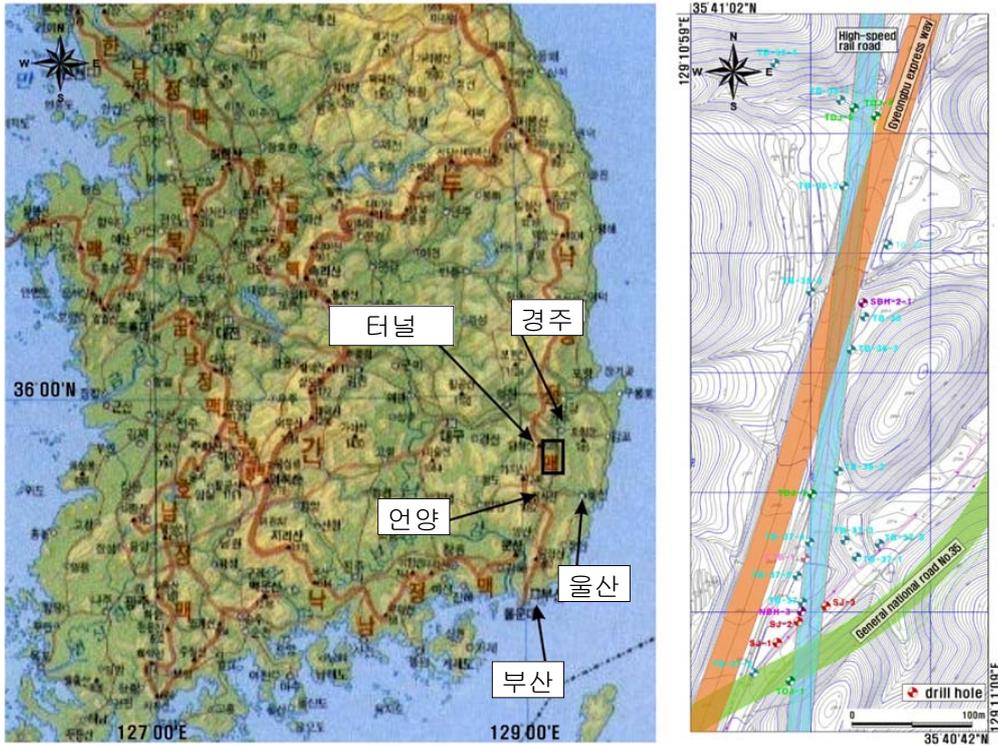


그림 4. 복안터널 위치 및 지질현황 (이창섭 & 이효민, 2009)

복안터널 설계를 위한 기존 조사결과(한국고속철도공단, 2003)에 의하면 터널구간에서 양산단층의 폭은 50~150 m이고 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 상시계측이 요구되고 있다. 개발 센서는 안전관리 우선순위가 가장 높다고 평가된 터널과 경부고속도로가 교차하는 단면 1개소에 설치되었다.

그림 5는 해당 단면의 계측 시스템 설치도이다. 16개(변형률 15개+ 온도보상 1개)의 광섬유격자센서를 내장한 FRP 스트립이 적용되었으며, 약 1.716m 간격으로 터널 라이닝의 변형을 측정할 수 있도록 구성되었다. 개발 시스템은 터널 전단면을 따라 비계를 설치하여 부착하였으며(그림 6), 전체 시스템의 설치에는 6시간 정도 소요되어, 기존 시스템에 비하여 열차 차단 시간을 상당히 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

데이터 수집 및 전송을 위한 인터로게이터와 PC는 현장에 설치하였다. 계측데이터는 MICRON OPTICS사의 sm130 Module을 이용하여 수집하였다. 이 장비는 FBG 타입의 광센서로부터 측정된 데이터를 저장할 수 있으며, 원격 제어가 가능토록 RS-232 시리얼 포트를 구비하여 CDMA 모뎀등을 통하여 원격으로 제어 및 측정이 가능하다. 해당 터널은 연장이 길기 때문에 유선 네트워크를 구성하기 어려운 상황이다. 해당 단면에는 광섬유 가속도계가 함께 설치되어 계측자료가 많기 때문에 무선으로 데이터를 전송하는 것이 불가능하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 현장에 PC를 설치하여 일정시간 데이터를 저장하고 있다가 1시간 단위로 CDMA 모뎀을 통해 측정된 데이터를 전송하는 양방향 제어

프로그램을 개발하였다. 그림 7은 개발된 모니터링 프로그램을 나타내며, 인터넷을 통하여 15분 간격으로 측정된 터널 라이닝의 변형을 확인할 수 있다.

해당터널은 현재 열차가 시범운영 중에 있으며 2010년 11월 개통 예정이다. 향후 열차 운행에 따른 장기적인 계측 데이터가 축적되면, 내구성 및 계측결과와의 유효성 등 적용 시스템의 검증이 가능할 것으로 기대된다.

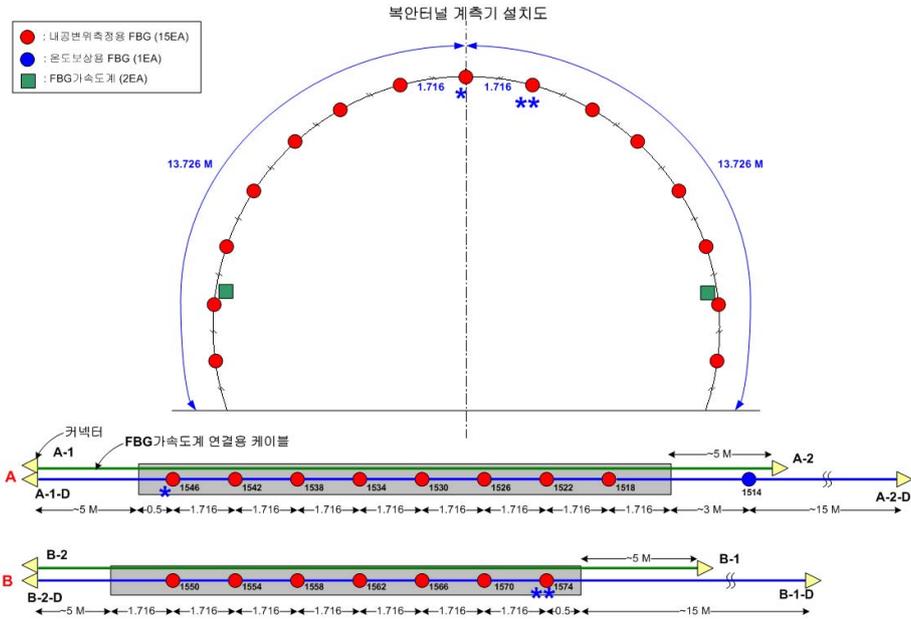


그림 5. 개발시스템 구성 및 설치 개요



그림 6. 개발시스템의 설치 전경

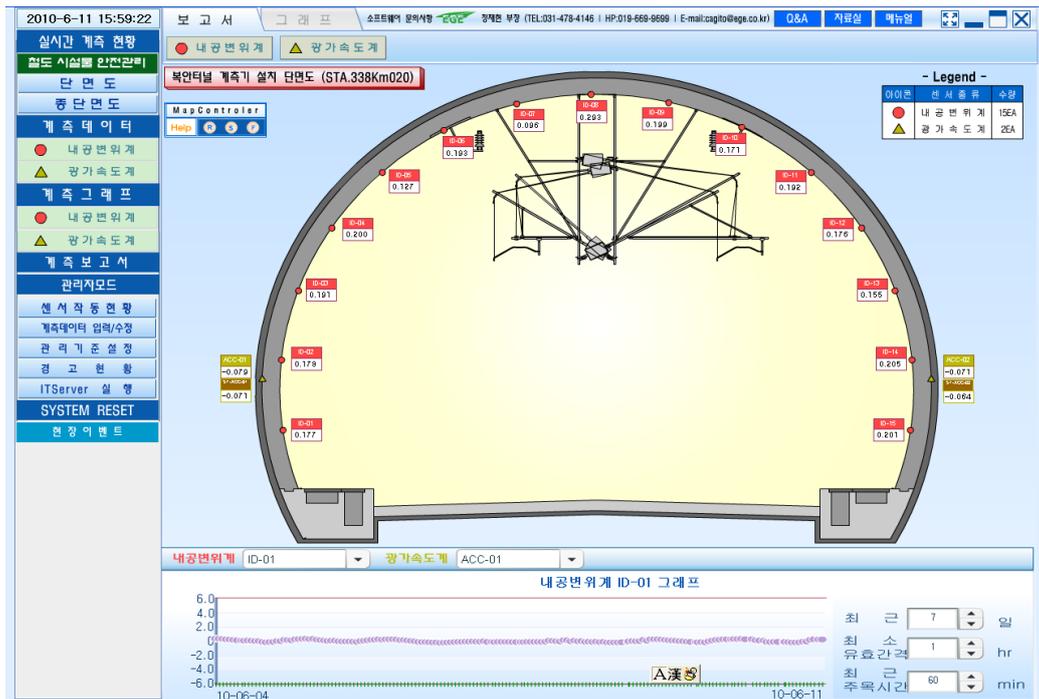


그림 7. 복안터널 라이닝 변형 모니터링 프로그램

5. 결론

본 논문에서는 광섬유격자센서를 FRP스트립에 부착한 터널라이닝 변형 센서 패키지를 철도터널에 적용한 사례를 소개하였다. 적용된 시스템은 광섬유센서를 적용하고 있으므로 철도선로의 고전압에 의한 계측의 불확실성을 배제할 수 있고, 터널의 라이닝에 추가적인 손상 없이 직접 부착할 수 있으므로 이미 완공되어 운용되고 있는 터널에도 쉽게 적용이 가능하다. 또한 최근 많이 건설되고 있는 장대터널에서의 계측데이터 전송 문제를 광섬유통신을 통해 쉽게 해결가능하다는 장점이 있다. 현재 진행되고 있는 계측 결과의 분석을 통해 그 유효성이 평가된다면 향후 신설터널 뿐만 아니라 기존터널에 대해서도 활발히 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설기술혁신사업의 연구비지원(06건설핵심B05)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 이창섭, 이효민, “양산단층을 통과하는 복안터널구간의 열수변질작용과 공학적 특성”, 한국광물학회지, 제22권, 제1호, pp.13-22, 2009.
2. 한국고속철도공단, “서울~부산간 경부고속철도 제12-4공구 노반신설 기타공사 지반조사보고서”, 2003