

- 동상발생 현황 및 사례와 동상저감 대책방안 검토
- 진레고가 하로ARCH 가설공법
- 철도시설물 모니터링 시스템 통합운영 방안
- 철도교량의 구조안전성 모니터링 시스템 개발
- OTDR를 이용한 낙석 및 변위검지용 고정장치 개발
- 광섬유센서 내장 FRP 스트립을 이용한 철도터널 내공변위 상시계측
- 분포형 광섬유 센서 기술을 이용한 철도 궤도 감시 시스템 개발
- 철도 시설물 자동화 계측을 활용한 경보 전파 시스템 개발
- 이미지 센싱기반의 재난영상 판독 및 안전감시 기법
- 조사차량을 이용한 비탈면 일상점검 지원 기술

- 이수형 | 한국철도기술연구원 무가선티램연구원 선임연구원(geoxlee@krti.re.kr)
- 이규완 | (주)카이센 대표이사(kaiseninfo@naver.com)



## 1. 서론

일반적으로 터널은 지층의 형태가 다양하고 분포가 일정하지 않은 지층에 건설되므로 시공단계부터 시공 안전성, 지반조건, 지보부재의 응력거동 및 안정성 등을 확보하기 위해 계측관리를 실시하여야 한다. 또한 터널의 안정성 평가를 위한 유지관리 기준치들은 시공단계부터 계측된 지반의 특성 및 거동 등을 고려하여 선정하는 것이 바람직하다. 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.

본고에서는 철도터널의 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 설치 가능하므로 현재 사용 중인 철도터널의 위험단면에 대한 변형 계측 방안으로 적합하다. 본 기사에서는 이 시스템의 특징과 경부고속선 ○○터널에 대한 시험 구축 계획을 소개한다.

## 2. 철도터널의 내공변위 기준

〈표 1〉은 이준석 등(2001)이 일본철도총합기술연구소(1990), NAV-FAC(1982) 등의 기존 문헌 조사를 통해 제안한 국내 철도터널의 천단부 변형에 대한 관리 기준치이다. 터널의 상태 등급에 따라 〈표 2〉와 같은 기준을 따라 열차 운영을 통제하고 있다.

〈표 1〉 NATM 및 개착식 터널 내공변위 (이준석 등, 2001)

등급	관리기준	비고
A	내공변위가 거의 발생하지 않은 경우 (천단부 처짐 3mm/년 이내)	일본철도총합기술 연구소 기준의 30%이내
B	내공변위가 발생할 가능성이 있다고 판단되는 경우 (천단부 처짐 3~7mm/년)	일본철도총합기술 연구소 기준의 30~70%
C	내공변위가 발생하기 시작했다고 판단되는 경우 (천단부 처짐 7~10mm/년)	일본철도총합기술 연구소 기준의 70%이상
D	상당한 내공변위가 발생한 경우 (천단부 처짐 10mm/년 이상)	일본철도총합 기술연구소기준

〈표 2〉 구조물의 성능평가 및 열차통제방안 (이준석 등, 2001)

등급	구조물상태	열차통제	조치사항
A	양호	정상	-
B	보통	주의	관찰 후 문제점이 없으면 정상상태로 복귀, 문제점 있으면 해결시까지 150km/h 이하로 서행시키고 유지·보수 요원을 현장에 보내어 외관조사 실시
C	불량	서행	열차를 50km/h 이하로 서행시키고 전문가에 의한 상세한 외관조사를 실시하고 적절한 조치를 취한 후 보통상태로 복귀
D	매우불량	운행정지	열차 운영을 통제시키고 적절한 보수·보강을 실시한 후 서행상태로 복귀

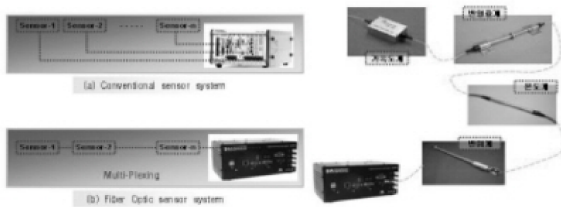
## 3. FRP 스트립 FBG 내공변위 측정 시스템의 개발

### 3.1 시스템 개요

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 22,000볼트의 고전압에 의한 자기장의 형성(유도장애)에도 불구하고 데이터의 신뢰성을 확보해야 하므로 계측 목적상 불가피하게 전기선로와 가깝게 설치해야 하는 내공변위계의 경우 광섬유 센서를 적용하는 것이 적합하다.

### 3.2 FBG 광섬유센서의 특징

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 사이 부식에 의한 결함이 생길 수 있는 단점이 있다. 그리고 각기 센서에 한 개의 리드선이 필요하게 되어, 자동화 계측 시스템과 센서간의 연결 리드선이 길어지게 되면서 전자기적 특성에 따라 정확한 계측 데이터를 얻을 수 없게 된다(그림 1).



〈그림 1〉 기존 전기식 센서와 FBG 광섬유센서의 비교

이에 비하여, 광섬유격자(FBG)센서는 재질이 석영(유리)이므로 재료의 특성상 부식이 발생하지 않는 장점이 있다. 그리고 광(빛)을 이용한 계측 방식이므로 전자기파에 의한 영향을 받지 않으며(그림 2), 낙뢰 및 간접뢰에 의한 센서의 손상이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 광섬유격자(FBG)센서는 빛의 파장을 이용한 신호처리로 전자기파나 기타 이상 전류 등과 같은 외력에 의한 영향을 받지 않으므로 안정적인 데이터 신호를 받을 수 있다. 광섬유격자(FBG)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.



(a) FBG 광섬유센서 (b) 전자기파에 노출된 센서의 응답특성  
〈그림 2〉 전자기파에 노출된 센서의 응답특성

### 3.3 FRP 스트립을 이용한 내공변위 측정의 원리

FRP-FBG 스트립센서는 터널에 일체식으로 부착·고정되어, 터널 라이닝과 동일한 형상으로 일체 거동을 하게 되며, 곡률-처짐 및 변형률과의 상관성을 이용하여 측정변형률에 따른 터널 라이닝의 전체적인 곡률 및 변위량을 알아낼 수 있다. 따라서 터널에 적용 시 연단거리 y를 파악하는 것이 가장 중요한 요소이다. 이를 위하여 라이닝 두께를 기준으로 연단거리 y를 추정하는 방법과 FRP-FBG 스트립 센서를 압축-인장부에 2단으로 설치하여 연단거리 y를 측정하는 두 가지 방법으로 현장 적용이 가능하다.

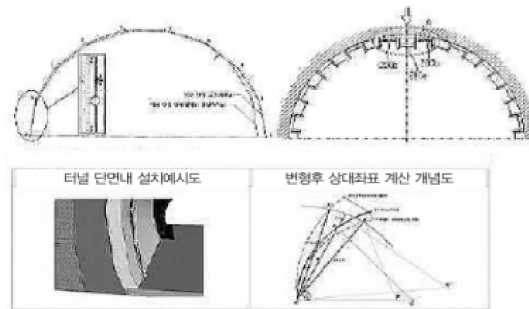
$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{M}{EI}$$

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

여기서,  $\kappa \cdot \rho$ : 곡률 및 곡률반경, x: 거리, v: 처짐곡선  
M: 모멘트, EI: 휨강성,  $\epsilon$ : 종방향 변형률, y: 연단거리

### 3.4 기존 FBG 내공변위 측정시스템과의 비교

FBG 광섬유센서를 이용하여 터널의 터널변위를 측정하는 기존의 방식은 〈그림 3〉에 나타낸 바와 같이 FBG long strain sensor를 이용하는 방법, 변형률-각도를 측정하여 추정하는 방법, 길이변화-각도변화를 측정하여 측정하는 방법 등 다양한 기법이 존재한다.

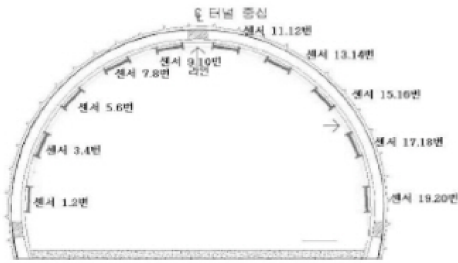


〈그림 3〉 기존 FBG 내공변위 측정방식

〈그림 4〉는 가장 많이 사용되는 FBG long 변형률 센서를 이용한 터널내공변위 측정의 예이다. 일반적으로 1m FBG long strain 센서

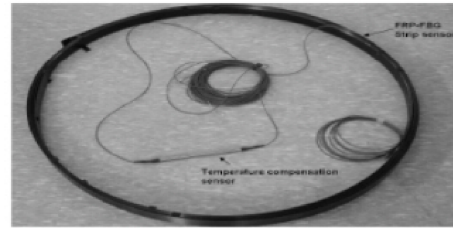
- 동상발생 현황 및 사례와 동상저감 대책방안 검토
- 진레고가 하로ARCH 가설공법
- 철도시설물 모니터링 시스템 통합운영 방안
- 철도교량의 구조안전성 모니터링 시스템 개발
- OTDR를 이용한 낙석 및 변위검지용 고정장치 개발
- 광섬유센서 내장 FRP 스트립을 이용한 철도터널 내공변위 상시계측
- 분포형 광섬유 센서 기술을 이용한 철도 궤도 감시 시스템 개발
- 철도 시설물 자동화 계측을 활용한 경보 전파 시스템 개발
- 이미지 센싱기반의 재난영상 판독 및 안전감시 기법
- 조사차량을 이용한 비탈면 일상점검 지원 기술

를 이용하여, 각 위치에서의 라이닝 표면 또는 내부의 변형률을 측정하여, 변형률-곡률 관계식으로부터 내공변위를 추정하는 방식이다. 그러나 이러한 적용방식은 1m 센서를 각 위치에 설치한 후, 현장에서 센서와 센서사이를 연결하여야 하기 때문에, 설치공정이 복잡하고 작업의 속련도가 필요한 단점이 있다. 또한 센서와 센서 사이는 패치코드에 의하여 연결되는데, 외부압력에 의하여 손상이 발생되거나 설치를 위하여 급격하게 벤딩을 주면 광손실이 커지는 단점이 있을 수 있다. 그리고 터널라이닝은 원형 구조체이기 때문에 게이지 길이에 따른 설치각도에 따라서 측정된 변형률 값이 왜곡될 수 있으며, 또한 콘크리트에 지그 고정 시 콘크리트와 지그의 설치조건에 따라서 측정응답의 신뢰성이 저하될 수 있는 단점이 있다.



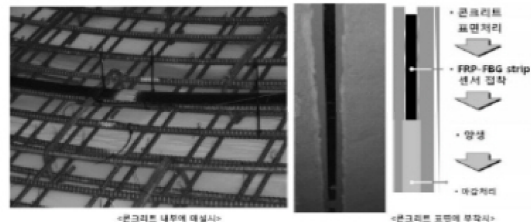
〈그림 4〉 FBG long strain sensor를 이용한 방법

이러한 단점을 극복하기 위하여, 〈그림 5〉에서 보는바와 같이 FRP-FBG 스트립 광섬유 내공변위 센서를 개발하였으며, 본 시스템은 터널 한 단면에 대하여 일체 시공이 가능하기 때문에, 센서와 센서 사이의 연결을 위한 광용착 또는 커넥터 작업 등의 속련도와 인력이 많이 소요되는 공정을 획기적으로 개선하여 현장에 설치가 매우 쉽고 비전문가에 의해서도 적용이 가능하다. 또한 공장에서 센서의 제작 및 품질관리가 이루어져 현장에서 발생할 수 있는 품질 오차 발생 가능성을 최소화하였으며, 기존 long gauge에 비하여 제작 단가 및 설치비용이 저렴하다. 그리고 CFRP는 반영구적인 재료이기 때문에 장기적인 내구성이 우수하고, 콘크리트 내부 및 표면에 부착이 용이한 장점이 있다.

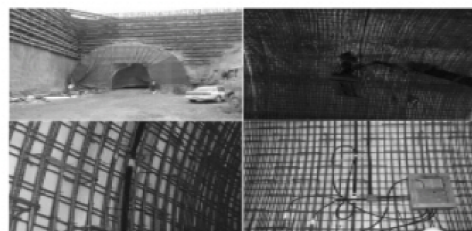


〈그림 5〉 FRP-FBG strip 광섬유 내공변위 센서

이러한 장점이 있는 FRP-FBG 스트립 내공변위 센서는 〈그림 6〉에서 보는바와 같이 라이닝 내부에 설치되는 경우에는 콘크리트 타설 이전에 현장에서 추가적인 광용착 등의 작업 없이 철근에 매달면 설치가 완료된다. 또한 콘크리트 표면에 부착시에는 지그 설치 등을 위한 추가적인 천공작업 없이 「표면치러→프라이머 도포→탄소섬유 에폭시 레진→탄소섬유관 고정설치 및 마무리」 등의 일반적인 설치공정에 의하여 콘크리트 표면에 부착 고정이 가능하다. 〈그림 7〉은 터널 콘크리트 라이닝 내부에 설치한 예이다.



〈그림 6〉 FRP-FBG 스트립 내공변위 센서의 설치방안



〈그림 7〉 터널 콘크리트 라이닝 내부에 설치한 예



### 3.5 FRP 스트립 FBG 내공변위 센서의 검증

개발된 FRP-FBG 스트립 내공변위 센서의 검증을 위하여 공인인증 기관에서 실험을 실시하였으며 UTM을 이용하여 시험편의 인장시험을 실시하였다. <표 3>은 수행된 실험의 개요를 정리하여 나타낸 것이다. FRP-FBG 스트립 내공변위 센서의 검증실험 광경은 <그림 8>

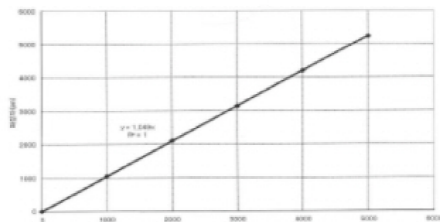
<표 3> 검증실험 장비 및 시험환경

실험장비명	인장압축시험기(SHIMADZU, Autograph AG-X 25-kN)
측정장비명	Micron Optics사의 sm130 FBG Interrogator
시험환경	온도 : 20±2℃, 습도 : 70% RH 이하
시험항목	인장하중 변화에 따른 파장 측정 - 인장시편 크기(mm) : 50×265 - 물림깊이(mm) : 50 - 인장압축시험기를 이용하여 시험편에 1, 2, 3, 4, 5 tonf의 하중으로 인장력을 가함 - 하중에 따른 FRP-FBG 스트립 내공변위 센서의 파장값을 측정

8)과 같으며, 검증실험 결과 하중-응답 그래프는 <그림 9>와 같다. 실험결과 R<sup>2</sup>=1로 완벽한 선형적인 응답특성을 나타내어 터널 내공 변위의 측정에 적합한 것으로 평가되었다.



<그림 8> FRP-FBG 스트립 내공변위 센서의 검증 광경

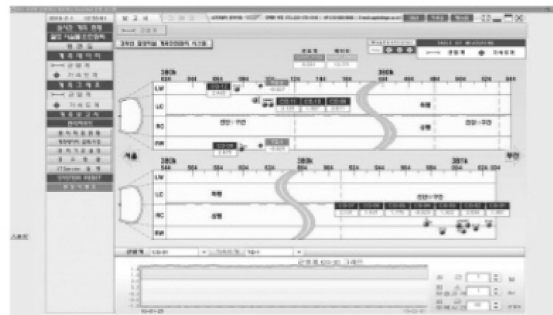


<그림 9> 검증실험 결과 하중-응답 그래프

### 4. 경부고속선 터널에 대한 시험적용

개발된 시스템은 경부고속선 2단계 구간인 OO터널에 적용할 예정이다. 설치 대상터널 구간에는 단층대가 지나고 있다. 시공 중 균열로 공사가 전면 중단되었던 터널로 단층대를 보강하기 위하여 터널 지상부에는 다수의 마이크로 파일을 설치한 상태이다. 특히 터널 구간 상부에는 주요 고속도로 및 국도가 지나고 있으므로 안전성에 대한 상세검증이 요구되고 있는 터널이다.

기존 안전관리 방안으로 4개 위험단면에 대하여 라이닝응력계, 록볼트축력계, 간극수압계 등의 시공 중 계측기를 그대로 유지하면서 영구 계측기로 전환하는 대책이 수립되어 있다. 개발된 FBG센서 내장 FRP스트립 내공변위계는 터널과 고속도로와 교차하는 1개 단면에 시범 설치된다. 설치된 개발 계측기와 기존 시공 중 계측기의 결과는 통합되어 터널의 전체적인 안정성을 평가하는데 적용된다. 측정된 데이터는 무선모뎀을 통하여 원격 지점에서 수집할 수 있도록 시스템을 구성하였으며 있으며, 계측값이 기준치를 초과하면 이를 관리 주체에 경보하는 통합프로그램도 개발되어 운용될 계획이다(<그림 10>).



<그림 10> 철도터널 상시 안전관리 시스템 구축예

이러한 안전관리를 위한 상시모니터링 시스템 시범 구축 사업은 국토해양부에서 발주하여 한국철도기술연구원에서 수행중인 “철도시설물 안전관리 네트워크 시범구축” 사업의 일환으로 진행되고 있다. 향후 축적되는 개발 내공변위계의 계측 결과는 기존 계측 정보와의 상호 비교를 통해 그 유효성 및 효율성에 대한 평가가 이루어질 예정이다.

- 동상발생 현황 및 사례와 동상저감 대책방안 검토
- 진례고가 하로ARCH 가설공법
- 철도시설물 모니터링 시스템 통합운영 방안
- 철도교량의 구조건강성 모니터링 시스템 개발
- OTDR를 이용한 낙석 및 변위검지용 고정장치 개발
- 광섬유센서 내장 FRP 스트립을 이용한 철도터널 내공변위 상시계측
- 분포형 광섬유 센서 기술을 이용한 철도 궤도 감시 시스템 개발
- 철도 시설물 자동화 계측을 활용한 경보 전파 시스템 개발
- 이미지 센싱기반의 재난영상 판독 및 안전감시 기법
- 조사차량을 이용한 비탈면 일상점검 지원 기술

## 5. 결론

본 기사에서는 광섬유 FBG센서를 FRP스트립에 내장한 터널용 전 단면 내공변위계의 특징 및 개발과정을 소개하였다. 개발된 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 시범구축을 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. 이준석, 최일윤, 문도영, 이희현, 2001, 고속철도용 터널의 상시계측 시스템 구축에 관하여, 터널기술, Vol.3, No.2, pp.63-67.
2. 일본철도총합기술연구소, 1990, 터널 보수·보강 매뉴얼
3. NAVFAC, 1982, Design Manual