운용중인 철도터널의 안전관리 시스템 시범구축

Development of Safety Monitoring System for Operating Railway Tunnel

이수형† 신민호* 김현기**

Lee, Su-Hyung Shin, Min-Ho Kim, Hyun-Ki

ABSTRACT

There has been need for safety monitoring systems for the social infrastructures. These infrastructures are subject to degradation over time, reduced functionality, and loss of functionality as a result of factors such as a wide variety of installation environments, natural disasters, and nearby work. Therefore, it is necessary to perform appropriate inspections, repairs, and renovations to ensure safe and efficient maintenance and operation. This paper introduces the example of the development of the safety monitoring system for operating railway tunnel. Tunnel profile measuring system using laser beam, crack gauges, accelerometer and a pluviometer were implemented to monitor the safety of a deteriorated tunnel. The measured data were transferred through wireless network and analyzed in real time. The safety criteria for tunnel stabilities and train operations are also discussed.

1. 서 론

최근 국가 주요 시설물의 안전성 확보를 위한 통합관리시스템의 필요성이 부각되고 있다. 특히 노후화된 철도터널에 대해서는 상시 안전관리시스템의 구축이 심각하게 요구되고 있다. 이를 위해서 구조물의 안전성을 효과적으로 판단하고, 적절한 유지보수를 취하기 위한 안전성 평가기법을 연구하고, 이를 적용하여 실제 구조물을 실시간으로 모니터링 하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 현재 운용중인 철도터널에 대하여 안전관리 계측시스템을 시범 구축한 예를 소개함으로써 향후 운용중인 터널의 안전관리 계측시스템을 구축하는 데에 자료를 제시하고자 한다. 시범구축은 호남선 00터널을 대상으로 하였으며, 기존의 안전진단 결과를 토대로 취약 단면에 레이저빔을 이용한 내공변위측정 시스템, 균열계, 강우량계, 가속계 등을 설치하였다. 계측자료는 무선통신을 이용하여 수집하고 실시간으로 분석함으로써, 상시 터널의 안전을 모니터링 할 수 있는 시스템을 구축하였다. 터널의 안전성 평가와 열차 운행 기준으로는 기존에 이준석 등(2001)이 제시한 방법을 적용하였다.

2. 대상터널 개요

안전관리 시스템 설치 대상터널은 호남선의 총연장 260m의 말굽형 복선터널로 1976년에 준공되어 32년간 운용되었다. 터널의 측벽 및 아치부는 무근콘크리트 라이닝 구조이며, 갱문 또한 무근콘크리트로 설계 및 시공되었다. 터널의 바닥 인버트는 시점부에 58.6m, 종점부에 48.6m 설치되어있고, 중심하수 방식의 배수형식을 취하며, 궤도의 도상은 자갈층으로 구성되어 있다.

대상터널은 2006년 수행된 정기점검시 상태평가 결과 C등급을 받은 전형적인 노후 철도터널로 누수, 균열, 박락으로 인한 다수의 보수, 보강 이력이 있다. 겨울철에는 누수로 인한 고드름이 생성되고 있는

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원
E-mail : geoxlee@krri.re.kr
TEL : (031)460-5399 FAX : (031)460-5319
* 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 수석연구원
** 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원

터널로, 안전관리 대책이 시급한 상황이다. 대상터널은 정밀조사에서 발견된 터널 배면에 공동을 대한 경량기포 모르터로 공동을 충진한 상태이다. 그림 1과 그림 2는 각각 터널 측면부와 천장부에 나타난 대표적인 변상 상태를 나타낸다. 대상터널에 대해서는 범용 구조해석 프로그램인 STAAD-Ⅲ을 이용한 2D-Frame 구조해석이 실시되었으며 터널 라이닝의 구조적인 안정성에는 문제가 없는 것으로 평가되었다.

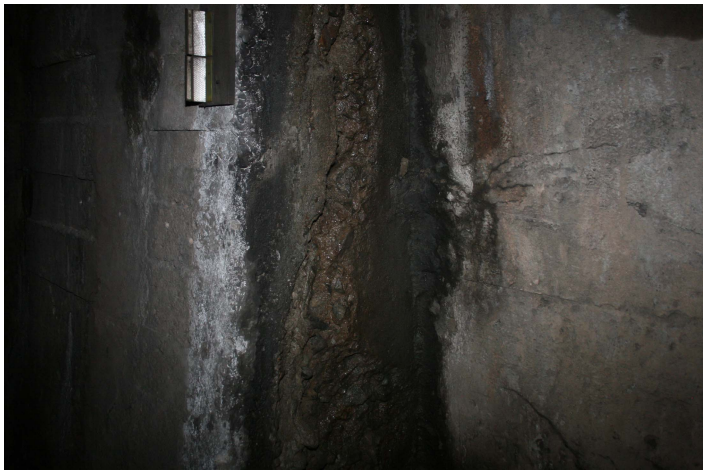

그림 1. 대상터널 측벽부 균열 및 박락

그림 2. 대상터널 천단부 박락 및 누수

3. 계측 설계

3.1 계측위치의 선정 및 주요계측항목

계측위치의 선정은 기본적으로 구조물에 변형이 발생하였을 때 열차의 운행에 가장 크게 영향을 미치는 단면과 구조적으로 손상이 큰 단면을 고려하였으며, 시공 및 유지관리 자료를 참고하여 누수와 균열이 발생한 개소를 선정하여 센서를 배치하였다. 계측항목 선정시 현재 운영 중인 터널인 점을 감안하여 터널의 단면에 크게 손상을 미치지 않고 설치할 수 있으며 일상적인 자동계측이 가능하도록 고려하여, 레이저빔을 이용한 내공변위계를 선정하였으며, 균열의 발달을 측정하기 위하여 종방향균열계와 횡방향균열계를 각각 3개씩 설치하였다. 터널 외부에는 강우량계를 설치하여 강우에 따른 터널 안정성의 변화도 파악할 수 있도록 하였다. 또한 터널 시종점부에 각각 가속도계를 설치하여 열차 운행 여부를 파악함으로써 열차 운행에 따른 계측결과의 오류를 배제할 수 있도록 하였다. 표 1은 설치된 계측기의 종류 및 수량을 나타낸다.

표 1. 주요 계측기 종류 및 수량

계측기 종류	수량
횡방향 균열계	3
종방향 균열계	3
레이저빔 내공변위계	1
가속도계	2
데이터 수집 및 전송 시스템	1

계측 시스템을 구성하면서 계측기의 선정을 두고 가장 중요하게 고려한 점은 계측기의 내구성 및 정밀도, 측정범위, 분해능, 노이즈의 영향 등이며, 이는 계측의 목적과 결과에 직접적으로 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다. 또한 철도의 특성상 고전압에 의한 전자기장의 형성(유도장애)을 감안하여 데이터의 신뢰성을 확보해야 하므로 계측목적상 불가피하게 전기선로와 가깝게 설치해야 하는 내공변위계의 경우 레이저빔을 이용한 형식으로, 균열계는 진동현식으로 선정하였으며 그 외의 경우에도 차폐 케이블 등을 사용하여 고전압의 영향을 최소화하였다. 대상터널에 설치된 레이저빔 내공변위계는 그림 3에 나타내었으며 선로 보수작업의 영향을 최소화하기 위하여 터널 내 대피소에 설치하였다. 내공변위계는 180도 회전하면서 레이저빔을 이용하여 터널 벽면의 10지점의 거리를 측정함으로써 터널 단면 형상을 측정한다.

그림 3. 레이저빔 내공변위계

3.2 계측데이터의 전송 및 처리

계측데이의 전송을 위한 통신 시스템으로는 CDMA 패킷망을 이용한 실시간 원격계측시스템을 구축하였다. 수집된 데이터는 자동계측 프로그램에 의하여 실시간 분류, 분석되고 안전관리기준을 적용하여 위험시 사용자에게 SMS, E-mail 등을 통한 경보가 가능하도록 구성되었다.

4. 철도터널 안전관리기법 결정

4.1 현행 국내 철도터널 안전관리

현재 철도터널에 대한 안전관리는「시설물의 안전관리에 관한 특별법」제13조 및 같은 법 시행령 제13조의 규정에 의한 「안전점검 및 정밀안전진단 지침」(국토해양부 고시 제 2003-170호, 2003. 6. 30, 이하 「지침」이라 한다)에 따라 이루어지고 있다. 이중 영구계측에 대한 사항에는 아래와 같은 관리 항목과 지침이 제시되어 있다.

"터널 시공 중에 실시하는 계측 중 영구적으로 활용할 수 있는 것과 유지관리에 필요한 항목을 구분하여 구조물의 관리뿐 아니라 진단에 활용할 수 있도록 한다. 그러한 목적에 적합한 항목은 표 10의 내용을 참고한다." 본 연구에서는 영구계측 항목 중에 운영중인 철도터널에 적합한 항목인 내공 및 천단침하에 대한 계측을 계획하였다.

표 2. 계측항목별 관리항목

계 측 항 목	관 리 항 목	비 고
- 내공 및 천단 침하	- 구조물변위	
- 라 이 닝 응 력	- 라이닝응력	
- 지 압	- 상부토압 배면토압 저부 상향압력	
- 지 중 수 평 변 위	- 횡방향 변위 및 사면안정	
- 지하수위(간극수압)	- 지하수 영향	

4.2 계측 항목에 따른 안전관리기법의 결정

터널의 안전성 판단을 위하여 시공 및 운용 중 변형에 대한 계측이 주로 이루어지고 있다. 그러나 변형의 정도에 따라 안정성을 판단하는 것은 상당히 어려운 문제이며, 현재까지 합리적인 관리기준치가 제시되지 않은 상태이다. 본 연구에서는 다양한 국내외 안전관리 기준치를 조사 분석하여 운용중인 터널에 대하여 가장 타당한 관리기준치를 적용하고자 하였으며, 이준석 등(2001)이 제시한 철도터널에 대한 안전관리 기준이 가장 적절한 것으로 평가되었다. 다음의 표 3, 4, 5는 터널의 계측항목에 대한 관리기준을 나타내고 있다. 또한 표 6은 각 관리기준 등급별 구조물의 성능평가에 대한 열차통제방안(안)을 나타내고 있다.

일반적으로 터널은 지층의 형태가 다양하고 분포가 일정하지 않은 지반내에 건설되므로 시공단계부터 시공의 안전성, 지반조건, 지보부재의 응력거동 및 안정성 등을 확보하기 위한 계측관리를 실시한다. 이와 같이 시공된 터널의 유지관리를 위한 계측관리기준은 시공단계부터 계측된 지반의 특성 및 거동 등을 고려하여 선정하는 것이 바람직하지만 현재 대부분의 철도터널 여건에서는 관리기준의 선정이 어려운 상황이다. 그러나 터널은 교량구조물과 달리 이론적으로 매우 안정된 구조물로 평가되며 실제로 설계조건과 크게 다르게 시공되지 않는다면 대체로 안전성을 확보하고 있다. 따라서 우선 국내외 문헌에서 제시된 값을 근거로 하여 일반적인 계측관리기준을 선정하고, 향후 계측시스템이 가동되어 안전관리 네트워크가 계측결과를 지속적으로 검토하여 수정・보완할 수 있을 것으로 기대된다.

표 3. NATM 및 개착식 터널 내공변위 (이준석 등, 2001)

등 급	관 리 기 준	비 고
A	내공변위가 거의 발생하지 않은 경우 <천단부 처짐 3㎜/년 이내>	일본철도종합기술 연구소 기준의 30%이내
B	내공변위가 발생할 가능성이 있다고 판단되는 경우 <천단부 처짐 3～7㎜/년>	일본철도종합기술 연구소 기준의 30%이상, 70%이하
C	내공변위가 발생하기 시작했다고 판단되는 경우 <천단부 처짐 7～10㎜/년>	일본철도종합기술 연구소 기준의 70%이상
D	상당한 내공변위가 발생한 경우 <천단부 처짐 10㎜/년 이상>	일본철도종합 기술연구소기준

표 4. 터널 천단 경사 (이준석 등, 2001)

등 급	관 리 기 준	비 고
A	경사가 1일 1/1000rad 이하로 측정되는 경우	거의 경사가 발생하지 않는 경우
B	경사가 1일 1/700～1/1000rad로 측정되는 경우	NAVFAC 기준의 약 70%이하
C	경사가 1일 1/500～1/700rad로 측정되는 경우	NAVFAC 기준의 약 70%이상
D	경사가 1일 1/500rad 이상으로 측정되는 경우	NAVFAC 기준

표 5. 균열변위 (이준석 등, 2001)

등 급	관 리 기 준	비 고
A	온도변위를 제외한 변위가 0.2mm이하인 경우	한국시설안전공단
B	온도변위를 제외한 변위가 0.2～0.3mm인 경우	한국시설안전공단
C	온도변위를 제외한 변위가 0.3～0.7mm인 경우	한국시설안전공단
D	온도변위를 제외한 변위가 0.7mm이상인 경우	한국시설안전공단

표 6. 구조물의 성능평가 및 열차통제방안 (이준석 등, 2001)

등급	구조물상태	열차통제	조 치 사 항	비고
A	양 호	정 상	-	시험운영 후 수정・보완 예정
B	보 통	주 의	관찰 후 문제점이 없으면 정상상태로 복귀, 문제점 있으면 해결시까지 150km/h 이하로 서행시키고 유지・보수 요원을 현장에 보내어 외관조사 실시	
C	불 량	서 행	열차를 50km/h이하로 서행시키고 전문가에 의한 상세한 외관조사를 실시하고 적절한 조치를 취한 후 보통상태로 복귀	
D	매우 불량	운행정지	열차 운행을 통제시키고 적절한 보수・보강을 실시한 후 서행상태로 복귀	

5. 결 론

본 논문에서는 운용중인 노후 철도터널에 대하여 상시 안전관리 계측시스템을 구축한 예를 소개하였다. 높은 전압으로 인한 전자기장이 형성되는 철도 선로의 특성을 고려하여 레이저빔을 이용한 내공변위계와 진동현식 균열계를 적용하였으며, 무선 네트워크를 이용하여 데이터를 수집하고 실시간 분석 및 경보가 가능하도록 시스템을 구성하였다. 계측항목에 대한 안전관리 기준치로는 기존의 문헌에 제시된 값을 적용하였으나, 향후 계측 및 열차 운영 데이터가 축적되면 보다 합리적인 기준치를 설정할 계획에 있다. 향후 2개의 터널에 대한 추가적인 시범구축이 계획되어 있으며, 노후화 터널에 대한 센서 기술도 병행되어 개발되고 있다. 이러한 기술개발이 완료되면 합리적이고 경제적인 철도터널에 대한 안전계측 시스템의 구축이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 이준석 (1997), “고속철도용 터널의 상시계측 시스템 구축에 관하여”, 대한터널협회지, 3(2), pp.63-67
2. 일본철도총합기술연구소 (1990), “터널 보수·보강 매뉴얼”
3. 한국시설안전공단 (2003), “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(터널)”
4. Naval Facilities Engineering Command (1982), “NAVFAC Design Manual”