

터널 유지관리계측의 효율화 방안 연구

A study on the efficient plan of maintenance monitoring for tunnel

백기현*¹, 오영석*², 김용전*³, 김영근*⁴

Baik, Ki-Hyun · Oh, Young-Seok · Kim, Yong-Jeon · Kim, Young-Geun

Abstract

In this study, general problems in the maintenance monitoring system, which is recently applied to tunnel designs, are brought up by investigating current technical issues and several practical situations. Furthermore, an efficient plan of the maintenance monitoring is suggested by considering the problems in their applications.

Keywords: Tunnel, maintenance, monitoring

요 지

본 연구에서는 최근 터널설계에서 반영되고 있는 유지관리계측에 대한 기술현황과 문제점을 검토하고, 현재 운영, 시험 적용되고 있는 유지관리계측 시스템의 실태를 조사하여 제반 문제점을 파악하고자 하였다. 또한 현재 국내에 도입되고 있는 각종 유지관리계측에 대한 적용상의 문제점을 고찰하여 이에 따른 유지관리계측의 효율화 방안을 제시하였다.

주요어: 터널, 유지관리, 계측

1. 서론

최근 다른 구조물과 마찬가지로 터널구조물도 점점 노후화 되어가고 변상이 진행되고 있어 터널의 내구성과 안정성을 확보하기 위한 효율적인 유지관리시스템이 필요한 시점이라 할 수 있다. 또한 사회기간시설의 전반적인 확충에 따라 터널구조물의 건설이 급격히 증가하고 있으며, 위험요소가 많은 구간에 터널이 만들어지고, 터널의 길이나 크기도 커지고 있어 이에 대한 효과적인 유

지관리방법이 요구되고 있다.

따라서 터널의 효과적인 유지관리를 위해서는 터널구조물의 변형상태를 정확하게 파악하는 것이 무엇보다도 중요하므로, 이를 위해서 장기적인 터널의 거동을 평가하기 위한 유지관리계측이 설계 또는 시공되고 있다. 최근의 경우 다양한 계측기술이 적용되고 상시적으로 터널의 거동을 모니터링 하는 자동계측시스템이 도입되고는 있지만 계측시스템에 대한 정확한 기준이나 운영체계에 대한 명확한 방법이 확립되지 못해 많은 시행착오를 겪고 있다.

*1 대우건설 기술연구소 선임연구원
*2 한국시설안전기술공단 부장
*3 한국도로공사 과장
*4 삼보기술단 지반부 이사

우선, 터널 유지관리계측에서 검토되고 해결해야 할 문제를 정리하면 다음과 같다.

- 계측항목 : 터널구조물의 계측 목적 (평가 or 감시)과 정밀도에 적합한 계측항목은?
- 계측방법 : 계측하고자 하는 요소에 대해 정확하고 효율적인 계측방법은?
- 계측시스템 : On-Line, On-Time 개념의 자동화계측시스템을 도입할 것인가?
- 계측관리 : 계측결과에 대한 처리분석 그리고 관리/평가기준은 어떻게 만들 것인가?

본문에서는 최근 터널설계에 반영되고 있는 유지관리 계측에 대한 기술현황과 문제점을 검토하고, 현재 운영 중이거나 시험 적용되고 있는 유지관리계측 시스템의 실태를 조사하여 운영상의 제반문제점을 파악하고자 하였다. 또한 현재 국내에 도입되고 있는 각종 계측기술과 계측시스템을 기술적으로 분석하고 유지관리계측 기술 적용의 문제점을 고찰하였다.

이를 통해서 터널 유지관리계측 분야에서의 설계·운영상의 전반적인 문제점을 분석하여 향후 적용해 나가야 할 국내 터널 유지관리계측 시스템의 효율화 방안을 제시하고자 하였다.

2. 터널 유지관리계측 현황 및 문제점

최근 터널설계시에 적용되고 있는 터널 유지관리계측

기술 및 시스템에 대한 검토를 통해 터널 유지관리계측의 적용상의 제반 문제점을 고찰하였다.

2.1 터널 유지관리계측 설계의 문제점

2.1.1 유지관리계측 설계 비교검토

최근에 실시된 도로 및 철도터널의 T/K설계를 중심으로 하여 계측기술과 유지관리시스템의 적용현황을 비교·검토하였으며 그 결과는 <표 1>에 나타내었다.

표 1에서 보는 바와 같이 유지관리 계측기술의 적용을 보면 기존 터널설계에서 사용되던 유지관리계측 항목(라이닝 응력, 간극수압 등)에 새로운 계측기술을 도입하고 있음을 볼 수 있다. 즉 터널의 변형거동이나 변화상태를 실시간으로 감시하기 위한 것으로서, 기존의 유지관리계측 기술이 가지고 있던 제반 문제점을 해결하기 위한 시도로 평가된다.

또한 유지관리계측기의 설치구간은 대부분의 경우 터널 시공 중 예상되는 단층파쇄대 구간과 연약대, 파쇄대, 갱구부, 접속부 및 연결부에 설치하도록 설계되었는데, 이는 터널구조물에서 상대적으로 가장 취약부라고 할 수 있는 지점에 유지관리계측기를 설치하여 터널의 거동을 측정하고자 하는 것으로 보인다.

그리고 터널의 유지관리계획은 제시된 모든 설계에서 자동화계측시스템을 적용하고 있으며, 또한 장기적으로 터널통합관리시스템과 연계하도록 설계되고 있다. 그러나 여기에는 구체적인 방법이나 체계 등이 명시되어 있지 않고 있으며, 설계에 적용된 시스템이 인접공구와의

표 1. 유지관리계측 설계 비교

터널	유지관리계측		유지관리시스템
	적용계측기술	설치구간	
철도 터널 (영동선)	광섬유 변형계	단층 통과대 대단면 접속부 갱구부 개착구조물 연결부	자동화 계측시스템
고속도로터널 (청주-상주고속도로)	터널단면 형상 변형 측정기	단층파쇄대	상시 유지관리시스템 터널유지관리시스템과 연계
도로터널 (능동터널)		단층 파쇄대 단층점도 협제구간	대표단면 계측활용 1-line 자동화 계측시스템
도로터널 (호남고속도로)	광변형 센서	파쇄대 연약대	자동화 계측시스템 터널통합관리시스템과 연계

적용 계측기술의 차이로 인해 호환성의 문제 및 관리의 복잡성 등이 발생할 것으로 판단된다.

최근 터널에 적용된 유지관리 계측기술의 설계를 비교 검토한 결과, 터널의 취약구간에 최신계측기술을 적용하여 터널의 변형거동이나 변화상태를 실시간으로 감시하고, 측정 데이터를 On-line상으로 전송하는 자동화시스템을 추구하고 있으며, 단순한 감시단계를 벗어나 터널의 변형상태에 대한 공학적인 평가나 안정성을 판단하기 위한 정밀계측 단계로 발전하고 있음을 알 수 있다. 그러나 실제 유지관리계획의 상세 계획 및 설계를 살펴보면 전반적으로 추상적이라 할 수 있으므로, 시험 계측 구간의 운영 등을 통하여 최적의 유지관리계획 방안을 모색되어야 할 것으로 판단된다.

2.1.2 유지관리계획 설계의 문제점

1) 최신계측기술의 무분별한 도입

최근의 각종 터널 유지관리 설계 사례로 살펴보면, 광변형센서, 단면변형측정기 등과 같은 외국에서 개발된 고가의 최신계측기술을 무분별하게 적용하고 있는 실정이다. 이러한 기술은 현재 검증이 안되거나 이론적 고찰이 부족한 상태에서, 일부 시험운영구간에서 많은 문제점을 양산하고 있는 실정이다. 그러므로 각종 계측기술에 대한 공학적 검증이 충분히 이루어지지 않은 상태에서 계측기술 도입은 많은 시행착오와 예산낭비 그리고 비효율적인 계측관리 등이 발생할 수 있음을 유의해야 한다.

2) 자동화계측시스템의 무계획적 적용

터널 구조물의 거동을 관리사무소 안에서 실시간으로 모니터링 할 수 있는 자동계측시스템이 모든 터널유지관리설계에 적용되고 있으나, 과연 모든 터널에 이와 같은 첨단시스템의 적용이 필요한지 또한 심각하게 검토되어야 할 것이다. 즉 터널의 중요도, 시공 중 지반상태 등을 감안하여 자동계측시스템의 유용성이 충분히 검토된 후에 설계에 반영하여야 할 것이다.

3) 계측자료 및 기준제시 미흡

최신의 계측기술에 의해 다양하고 많은 계측자료들이 얻어지고는 있지만 이에 대한 정확한 분석방법 즉 기준

이 제시되어 있지 않고 있다. 즉 계측치의 획득시간 간격, 처리방법, 분석프로그램, 감시나 안전판단기준이 명확하지 않은 상태에서의 기술적용은 무의미하다고 할 수 있다.

4) 계측목적에 따른 계측 정밀도의 검토 부재

일반적으로 계측은 그 목적에 따라 계측의 정밀도를 결정하게 된다. 즉 공학적으로 안전성을 평가할 것인지, 아니면 터널의 변화상태만을 경시변화 측면에서 관찰할 것인지에 따라 적용되는 계측기술의 수준이나 계측시스템의 운영방법이 달라져야 할 것이다.

5) 통합관리시스템에 대한 원칙적 수준의 제안

대부분 터널설계의 유지관리계획에 있어서 통합관리 방안을 제시하고는 있지만, 원칙적인 수준에 머무르고 있을 뿐 통합관리를 위한 구체적인 방안이 제시되고 있는 것은 않은 가운데 무엇보다도 통합관리를 위해서는 통합관리 처리프로그램 등과 같은 기본적인 Tool과 통일된 지침이 만들어져 할 것이다.

2.2 터널 유지관리계획 운영 실태 및 문제점

2.2.1 유지관리계획 운영 비교분석

국내에서 운영되는 있는 유지관리계획 기술의 전반적인 문제점을 검토하기 위하여 고속도로터널, 지하철터널, 고속철도터널에 대한 운영실태 및 현황을 고찰하였다. 먼저 각각의 경우에 대한 적용 계측기술과 시스템을 비교 분석하였으며, <표 2>와 같다.

계측항목을 살펴보면 고속도로터널의 경우 라이닝 응력과 간극수압 등의 항목이 주를 이루고 있으며, 지하철터널의 경우에는 도심지 천층터널과 철근콘크리트 라이닝의 특성을 반영한 대표단면계측이 포함되어 있으며, 고속철도터널의 경우에는 발생균열에 대한 변위와 터널 중방향의 변화상태를 파악하고자 하는 경사측정이 특징적이라 할 수 있다.

최근 들어 대부분의 유지관리계획에서 3차원 내공변위계, 광섬유센서, 전단면 내공변위 감지기, 광센서 변형률 게이지 등과 같은 최신 계측기술의 적용이 활발해지고 있음을 볼 수 있는데, 이들의 계측방법은 대부분 수동

표 2. 관리주체별 터널 유지관리계측의 운영상황 비교

구 분		유지관리계측			
		계측항목	설치수량	계측기술	계측방법
고속도로터널	공용중	숏크리트 응력, 록볼트 축력 지중 변위, 간극수압, 라이닝응력	92개소 42단면		자동+인력
	건설중	간극수압, 라이닝응력 3차원내공변위	325개소 114단면	3차원내공변위 측정계	자동+인력
지하철터널	서울시 2기 1단계	· 대표관리단면 : 토압계, 수압계, 철근응력계 콘크리트응력계 · 일상관리단면 : 3차원광과측정, 광섬유센서, 전기저항식변위센서	수동매립식 73개 자동부착식 171	광섬유센서	자동+수동
	서울시 2기 2단계	· 대표관리단면 : 1단계와 동일 · 일상관리단면 : 전단면내공변위	수동매립식 661개 자동부착식 9개	전단면 내공변위센서	자동+수동
고속철도터널	경부고속철도 (시험구간)	· 균열변위 · 경사 : 터널종방향 · 내공변위	균열계 2 경사계 16 내공변위12	광센서 변형율게이지 (FO-SSG)	자동

계측과 자동계측이 혼합되어 운영되고 있는 가운데 고속 철도터널의 경우에는 모든 계측에 자동화 계측시스템을 적용하고 있다. 또한 현재 고속도로, 지하철 및 고속철도 터널에서는 유지관리계측에 대한 시험운영의 성격이 크다고 판단된다.

2.2.2 유지관리계측 운영 문제점

현재 운영중인 유지관리계측의 현황을 분석하고 운영상의 문제점을 정리해 보면 다음과 같다.

1) 계측기 손망실에 따른 계측의 지속성 문제

공용중인 터널에서 유지관리계측의 가장 큰 문제는 계측기의 손망실이다. 계측기간이 장기화되면서 계측기의 수명이 다해 더 이상 계측을 수행할 수 없는 경우가 발생하는 경우, 이 부분에 대한 계측자료를 획득할 수 없어 유지관리계측의 의미를 상실하게 되는 경우에 대한 대안이 마땅치 않다는 것이다. 특히 매립식 계측기인 경우에는 이러한 문제가 빈번히 발생하므로 보다 신중히 고려하여 계측설계를 하여야 할 것이다.

2) 검증이 안된 최신 계측기술의 도입에 따른 시행착오

최근 터널에서의 계측관리를 보다 효율적으로 수행하기 위하여 외국의 첨단계측시스템을 도입하여 시험 적용하고 있지만, 그 성과는 기대에 미치지 못하고 있다. 이는 적용된 계측기술로부터 얻어지는 Output과 터널 안전성과의 상관관계에 대한 공학적 검증이 부족한 상태에서의 도입에 따른 시행착오를 겪고 있기 때문이다.

이로 인해 현재는 계측으로부터 터널의 안전성여부를 정량적으로 파악하려는 당초목적과는 달리 터널구조물의 변화상태만을 모니터링 하는 수준에 머물고 있는 상태라 할 수 있다. 또한 도입된 계측시스템의 전체적인 기술을 외국기술에 의존하다보니 비용이 과다하게 소요되고, 기술의존도가 커서 향후 시스템 변경이나 교체시에 많은 문제점이 예상된다.

3) 무의미한 계측치의 축적 및 처리문제

자동계측시스템을 적용한 경우에는 실시간으로 많은 계측치가 축적되고 있지만 계측되어 나온 결과가 어떤 공학적인 의미의 수치인지를 파악할 수 없는 상태에서

일정한 시간간격으로, 계속적으로 쌓이고 있다. 즉 공학적으로 판단이 어려운 계측치들이 홍수를 이루게 되고 이를 저장하고 보관하는 과정에서부터 문제가 발생하고 있으므로 이에 대한 효과적인 처리방안이 마련되어야 할 것이다.

4) 계측관리기준의 부재

현재 국내 터널에 적용되고 있는 부착식 계측기의 경우 콘크리트라이닝에 부착하여 라이닝의 거동 (변위나 응력)등을 측정하도록 하고 있는데 이때 측정된 계측결과로부터 터널구조물의 안정성을 평가하기 위해서는 많은 경험과 전문기술이 요구되기 때문에 계측치의 평가기준을 만드는 일이란 그리 쉬운 일이 아니다. 그러나 다양한 종류의 공용중인 터널에 대한 안정성확보를 위해서는 터널의 공법 (NATM터널, 재래식 터널 등)과 라이닝 상태 (무근, 철근콘크리트) 등에 따라 적용되는 명확한 관리기준이 마련되어야 할 것이다.

2.2.3 국외터널의 유지관리계측 분석

국외터널의 유지관리계측 시스템의 분석을 위해 프랑스의 지하철 터널, 일본의 세이칸 터널 그리고 홍콩의 Eastern Harbor 터널에 대하여 고찰하였다. 이들 터널에 적용된 유지관리계측 시스템을 비교, 검토하여 정리하면 다음 <표 3>과 같다.

<표 3>에서 보는 바와 같이 국외에서 유지관리계측이 적용되는 터널은 근접공사로 인하여 안정성의 저해가 예상되는 경우와 높은 수압 등이 작용하는 해저터널과 같이 특수한 경우에 국한하여 터널 유지관리계측

이 실시되고 있음을 알 수 있다. 이것은 국내 터널에 대해 장기적인 안정성에 큰 문제가 없다고 판단되는 일반터널의 경우에도 최신의 자동계측시스템이 적용되고 있는 상황과는 크게 비교된다고 할 수 있다. 다시 말하면 국외 터널의 유지관리계측은 터널의 안정성에 심각한 영향을 줄 수 있는 경우에 한해서만 터널 유지관리계측을 실시하고 있는 것으로서, 이는 유지관리계측의 비용과 효율성을 고려할 때 매우 타당한 것으로 판단된다.

또한 터널 유지관리계측의 수행방법은 모두 자동계측 시스템을 적용하고 있는데, 이는 공용중인 터널의 경우 터널 내에서의 작업시간이 제약을 받고, 인력으로 계측 자료를 일일이 획득하기가 어려운 이유 때문인 것으로 판단된다.

일례로서, 프랑스 지하철터널의 경우 적용된 계측기술은 광변형센서를 사용하였는데, 이것은 지하구조물이라는 특수성을 고려한 것으로서, 비교적 노이즈가 적고, 동적 거동을 파악할 수 있는 장점이 있기 때문이라 판단된다.

국외터널에서의 유지관리계측은 최신 계측기술을 적극적으로 활용하되 유지관리계측이 반드시 필요하다고 생각되는 터널에 한하여 제한적으로 실시하고 있으며, 유지관리계측에 대한 전문회사가 이를 전담하여 계측자료의 처리, 분석에 대한 전문성을 띠고 있음을 확인할 수 있었다.

표 3. 국외터널에서의 유지관리계측의 일반사항

구 분	터널특징	계측항목	계측시스템	적용계측기술	특 징	
프랑스 지하철	Bercy역	하부터널시공	변위	자동계측	광변형센서	동적자료 획득
	Chatalet역	신규노선통과	변위	자동계측	광변형센서	관리기준 15±5mm
일본 세이칸 터널	해저터널	내공변위 용수량	자동계측		지진방재시스템과 연계	
홍콩 Eastern Harbor 터널	해저터널 인접터널굴착	변형율 (종방향/횡방향) 수직변위	자동계측	Strain Gage 침하게이지	3차원 변형측정	

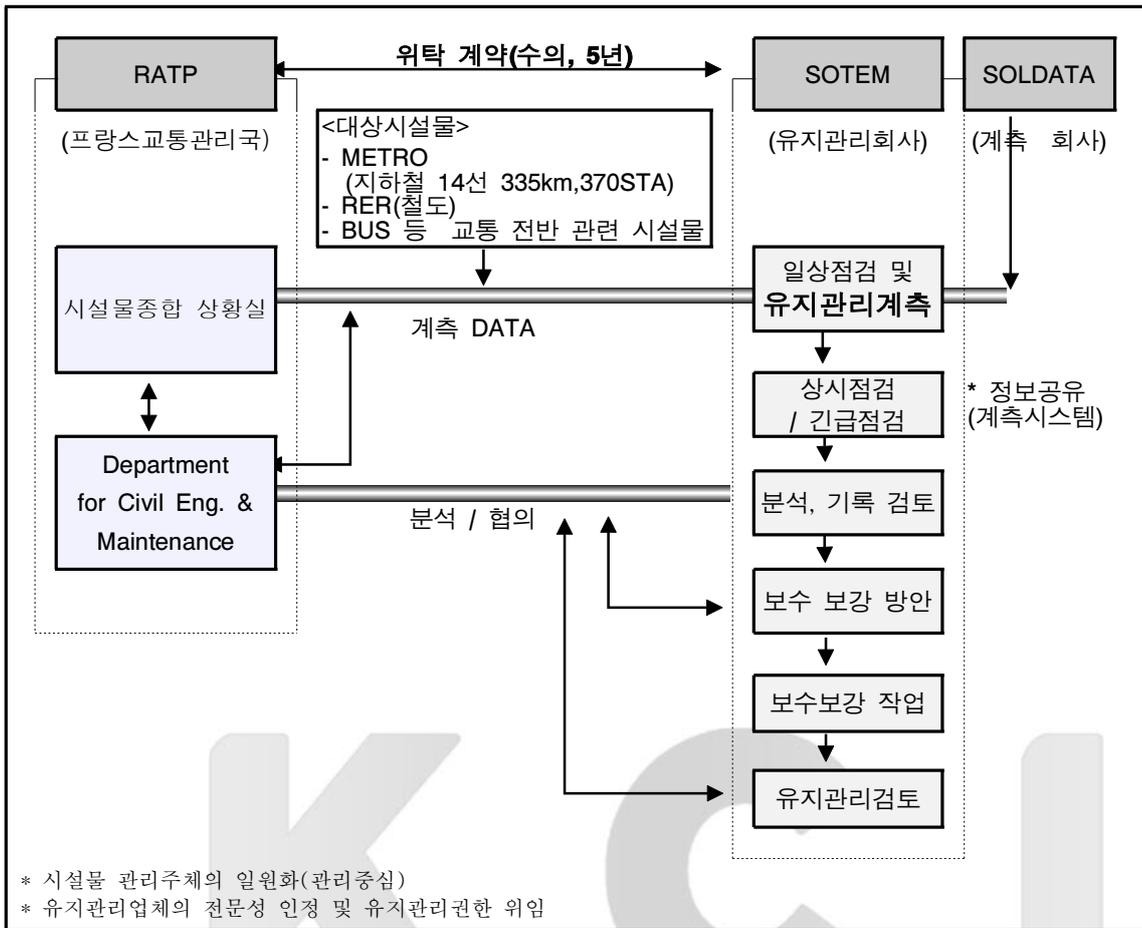


그림 1. 프랑스 파리의 유지관리계측 시스템

3. 터널 유지관리계측 기술 및 시스템 분석

터널 유지관리계측은 구조물의 안전관리와 진단에 필요한 각종 정량화된 현장자료를 체계적으로 유일하게 제공해준다는 점에서 터널 구조물의 유지관리에 있어서 매우 중요한 역할을 하고 있다.

일반적으로 터널 유지관리계측은 시공 중 계측과는 달리 장기간에 걸쳐 계측이 수행되고, 시공 완료 후의 터널 거동 또한 매우 작은 값을 가지고 지속적으로 진행되기 때문에 계측기기의 선택 및 유지관리 방법에 선정함에 있어서 터널의 특성을 고려하여 차별화 된 방안의 적용이 필요하게 된다.

이를 위해서는 정밀도가 높은 계측기가 선택되어야 하며, 아울러 장기간에 걸친 안정된 자료의 획득이 중요하므로 자동화 계측이 이루어져야 할 것이다. 이와 함께 계측 단면의 결정은 지반이 취약한 구간이나, 토피고가 낮은 구간 및 구조물 인접구간의 경우뿐만 아니라 터널을 대표할 수 있는 단면을 선정하여 취약부의 안정성과 함께 전체 터널 거동의 전체적인 경향을 파악, 평가할 수 있어야 한다.

3.1 터널 유지관리계측기의 문제점 분석

터널 구조물의 거동을 효과적으로 측정하기 위하여 각

중 계측기술이 도입되어 적용되고 있는 가운데 여기서는 국내에 소개되거나 시험, 운영되고 있는 최신 계측기술에 대하여 기술적으로 검토하여 터널 유지관리계측에의 적용상의 문제점을 분석하고자 하였다.

1) 광섬유 센서

광섬유시스템의 적용상 가장 큰 문제는 유지관리 종사자들에게 광섬유 센서의 측정값이 센서의 길이 변화만을 나타내는 것임에도 불구하고 이것이 터널의 내공변위 측정치로 잘못 인식되어 있다는 것이다. 따라서 측정값이 터널의 구조적 안정성과의 상관성이 검증되지 않은 상태이므로 터널 변위의 정량적인 평가가 불가능하고 단지 터널의 거동여부에 대한 감시기능밖에는 하지 못한다는 것이다.

또한 주기적으로 측정되어 오는 계측치에 대한 처리 및 관리지침 또한 없는 상태로 일정한 간격으로 측정된 후 지속적으로 측정되는 자료가 현재의 관리시스템을 초과하게 되어 계측자료의 관리가 또 다른 문제로 제기되고 있다. 고가의 비용을 들여 계측시스템을 구축하고 시험적으로 운영을 하고는 있지만 효과는 그리 크게 나타나고 있는지는 않고 있다.

2) 3차원 광파기 변형측정 시스템

3차원 광파기 변형측정시스템을 적용함에 있어서 가장 큰 문제로는 측정기의 설치와 측정장치의 유지관리라 할 수 있다. 즉 자동계측을 위해서는 반사경과 고가의 측정장비를 고정식으로 터널내부에 설치해야 하는데 도로나 철도터널의 경우에는 이를 관리하기가 현실적으로 불가능하다고 할 수 있으며, 또한 터널 내에 설치된 고정점이 터널변형이 일어날 수 있는 위치라면 측정결과를 신뢰할 수 없다고 할 수 있다.

그러므로 터널 시공중 계측과 마찬가지로 반사경 설치 후 인력에 의해 이동해 가며 터널 내공변위를 측정하는 Free station system을 적용해야 할 것으로 판단된다. 현재 도로터널의 경우 이러한 방식이 유지관리 계측에 일부 적용되어 건설 중에 있지만 차량이 고속으로 운행 중인 경우에서의 측정상 안전이나 오차를 최소화할 수 있는 방법이 마련되어야 할 것이다.

또한 터널 라이닝의 내공변위에 대한 기준이 명확하지

않다는 것이다. 다시 말하면 터널구조물이 1차 지보재에 안정화된 상태에서 장기적으로 지보성능의 저하와 근접 시공과 같은 외부지반조건의 변화에 의해 터널 라이닝에 변화가 발생하게 되는 경우 터널안정성에 영향을 미치는 관리기준치 (변위량, 변위속도 등)가 제시되어야 할 것이다.

3) EL Beam Sensor

EL Beam Sensor는 기본적으로 구조물의 상대변위와 회전정도를 측정하기 위한 시스템으로서, 터널구조물에 적용할 경우에는 터널 측벽이나 천정부에 설치하여 변위를 측정할 수 있으나, 터널의 내공변위를 측정하기 위해서는 수직 및 수평센서와 앵커를 설치해야 하는 문제점이 있으므로 수평 및 수직변화량으로부터 터널의 내공변위를 정확하게 측정할 수 있는지에 대한 공학적인 검증이 먼저 선행되어야 할 것이다.

또한 다른 측정기와 마찬가지로 측정기의 설치와 측정장치의 유지관리에 문제가 있을 수 있다. 즉 측정 센서가 외부로 노출되어 파손의 문제가 있으며, 전체적인 터널 단면의 거동을 측정하기에는 많은 센서가 필요하여 유지관리가 더욱 어렵게 될 수 있다.

현재 EL Beam Sensor 계측시스템이 자동화 계측시스템으로 구축되어 운용될 수는 있으나, 국내 터널에서의 계측 및 결과에 대한 검증이 부족한 상태에서는 계측시스템의 적용에 대한 충분한 검토가 필요하다고 생각한다.

4) BCS (Basset Convergence System)

BCS 계측시스템은 EL Beam Sensor를 변형한 계측시스템으로서, 터널의 변형된 형상을 측정하기 위하여 여러 개의 장축(Long arm)과 단축(Short arm)에 EL Beam Sensor를 부착하게 되어있어 설치뿐만 아니라 유지관리상에 많은 문제가 내재되어 있다. 즉 다수의 센서가 터널라이닝에 설치되므로 차량운행시 진동이나 충돌에 의한 파손 등이 일어날 수 있으며, 만약 하나의 센서가 고장날 경우 전체적인 터널변형상태를 측정할 수 없게 되는 문제가 있다.

본 계측시스템은 자동계측이나 이를 처리 분석하는 S/W 등의 장점이 있으나 다른 계측기술과 마찬가지로 국내터널에서의 터널거동과 계측결과에 대한 공학적인

검증이 요구된다.

5) T.P.M.S (Tunnel Profile Monitoring System)

TPMS 계측시스템은 BCS 계측시스템을 개선한 것으로서, 단축을 제거하여 터널에 밀착하도록 하였지만, BCS 계측시스템과 마찬가지로 터널의 변형형상을 측정하기 위하여 여러 개의 센서를 부착하게 되므로 설치뿐만 아니라 유지관리상에 문제가 있을 수 있다. 즉 다수의 센서가 터널라이닝에 설치되므로 차량운행시 진동이나 충돌에 의한 파손 등이 일어날 수 있고, 만약 하나의 센서가 고장날 경우에는 전체적인 터널 변형상태를 측정할 수 없게 되는 문제가 있다.

따라서 본 계측시스템 역시 다른 계측기술과 마찬가지로 국내터널에서의 터널거동과 계측결과에 대한 공학적인 검증이 요구된다.

6) D.O.C.S (Digital Optic Conversion System)

D.O.C.S 계측시스템은 디지털 광학기술을 이용하여 변위각과 길이변화를 측정할 수 있지만, 다른 계측시스템과 마찬가지로 터널의 변형형상을 측정하기 위해서는 여러 개의 센서를 부착해야 하기 때문에 설치뿐만 아니라 유지관리상에 많은 문제를 초래할 수 있다. 즉 터널의 경우 다수의 센서가 라이닝에 설치되므로 차량운행시 진동이나 충돌에 의한 파손 등이 일어날 수 있으며, 만약 하나의 센서가 고장날 경우 전체적인 터널변형상태를 측정할 수 없게 되는 문제가 있다.

따라서 본 계측시스템은 계측자료의 측정, 송수신 문제 등을 보완하여 자동계측이 용이하도록 되어 있지만, 다른 계측기술과 마찬가지로 국내터널에서의 터널거동과 계측결과에 대한 공학적인 검증이 요구된다 할 수 있다.

3.2 터널 유지관리계측 기술의 적용 문제점

1) 외국개발 계측기술의 도입 문제

앞에서 검토한 바와 같이 최신 계측기술의 경우에는 외국기술에 의해 개발된 것들이 주를 이루고 있는데 이러한 기술들이 대부분은 당장 도입하여 사용함에 있어 많은 문제점을 가지고 있다.

먼저 초기도입비용이 과다하며, 외국기술에 기술종속

이 될 수밖에 없다는 것이다. 도입초기에 턱없이 비싼 기술료를 지급하였음에도 불구하고 설치 및 유지관리상에서도 지속적인 기술료 및 사용료를 지급해야 하며, 사용상 문제가 발생하게 되면 이에 대한 대처능력의 부족으로 즉각적인 대책마련이 어려운 실정이므로 최신 해외 계측기술을 도입하는 경우에는 충분한 검토 및 유지관리상의 제반대책을 마련해야 할 것이다.

2) 터널 유지관리계측의 적용성 검증 문제

대부분의 최신 계측기술은 첨단 전자기술을 이용하여 구조물의 변형상태를 측정할 수 있도록 개발된 것으로서, 아직까지는 터널구조물에서의 적용성이 충분히 검증되지 않은 상태라 할 수 있다. 즉 터널의 경우 계측기가 터널 라이닝의 벽면에 외장형으로 설치되는 것이 일반적이라 할 수 있는데, 실제로는 터널의 주변지반과 라이닝과의 상호작용 문제, 지반하중의 문제, 라이닝의 지보역할 문제 등과 같은 지반의 변형과 관계된 복잡한 문제로 인한 변위의 측정이 터널계측에 있어 중요하므로 단순히 라이닝에 대한 변위측정 위주의 계측만으로는 해결할 수 없는 고유한 문제를 안고 있기 때문이다. 또한 터널과 같은 원형구조인 벽면에 연속적으로 센서를 설치하여 내공변위를 상대적으로 구한다는 것이 이론적으로 가능하다고는 하나 신뢰성 있는 계측결과를 얻기 위해서는 이에 대한 실험적인 검토가 함께 이루어져야 할 것이다.

3) 계측장비의 유지관리 문제

터널에 설치된 계측기의 대부분은 터널 라이닝의 벽면에 외장형으로 설치되므로 차량이나 열차운행에 따른 충격과 진동 등 열악한 지하환경에 의해 파손이 발생할 수 있으므로 정밀계측기 자체의 내구성문제가 먼저 충분히 검토되어야 한다. 특히 터널의 경우 지반거동이 장기적으로 진행되기 때문에 수년간에 걸쳐 계측이 이루어져야 하므로, 장기적인 계측에 따른 계측기의 유지관리문제가 충분히 검토되어야 할 것이다.

4) 계측장비의 호환성 문제

최근 다양한 계측기술들이 발주처, 설계사 그리고 시공사의 제안에 따라 다양한 경로를 거쳐 터널에 도입되고 있다. 특히 바로 인접공구의 경우에서조차 전혀 호환

이 안되는 다른 계측장치가 도입되고 있어 장기적인 관점에서 보면 계측장치의 호환성이 큰 문제로 대두될 것 이이다. 따라서 발주기관별이라도 유지관리계측기술에 표준화 그리고 체계적인 계측시스템의 도입기준 등이 마련되어야 한다.

3.3 유지관리계측 시스템의 문제점 및 개선방향

3.3.1 계획 및 설계의 문제점

유지관리계측의 계획 및 설계는 실제 터널구조물의 계측관리에 앞서 가장 먼저 검토되어야 할 중요한 사항으로서, 실제 이 중요한 단계를 소홀히 생각하여 전체적인 시스템의 운영이 비효율적으로 운영되고 있는 경우가 대부분이라 할 수 있다.

이에 기존의 유지관리계측의 계획 및 설계단계에서의 문제점들을 살펴보면 다음과 같다.

1) 유지관리계측의 대상 선정

- 터널의 유지관리계측 시스템 선정기준의 불분명함
- T/K 설계시 일부 터널의 경우 유지관리계측에 대한 내용이 너무도 막연하게 기술되어 있으며, 구체적인 시스템 선정기준이 제시되어 있지 않음

2) 유지관리계측 시스템의 선정

- 초기 투자비에 우선한 수동계측 위주의 계측 실시
- 자동 및 수동 계측의 합리적인 분류 미흡

3) 유지관리계측의 신뢰성 및 연속성 유지 방안

- 계측기의 선정에서부터 계측관리에 이르는 전 과정에 대한 일관성 부족
- 전문 유지관리계측 담당자 확보의 어려움

4) 유지관리계측기종의 선정

- 계측기기 성능 확인 곤란
- 담당기술자의 숙련도에 따라 계측기 손상 및 계측 결과치의 신뢰도 저하

5) 유지관리계측기의 내구연한 및 무상보증기간

- 서울지하철 등의 예를 살펴볼 때 설치된 계측기의 손상율이 너무 높아 유지관리계측기에 대한 철저한 품질보증에 필요함

이상과 같은 유지관리계측 계획 및 설계단계에서의 개

선방향을 제시하면 다음과 같다.

3.3.2 계획 및 설계의 개선방향

1) 우수한 계측기종의 선정

공용중인 터널의 유지관리에 적용되는 계측기의 선정은 현장의 적용성, 신뢰성, 정확성 및 내구연한 등을 종합적으로 검토한 후 선정되어야 한다. 특히 매립식의 경우에는 향후 유지관리에 문제가 발생할 수 있으므로 내구연한의 보장이 중요한 선정 요소가 된다. 또한 기존의 적용 실적은 선정의 좋은 기준이 되므로 계측관리 실적에 대한 평가 또한 병행되어야 된다.

계측기기의 성능은 국내에서도 꾸준한 연구개발이 진행되고 있어 여러 계측전문업체에서 매우 다양한 종류의 계측기가 생산되고 있다. 그러나 국내 계측기의 경우 아직까지는 계측기의 품질 및 신뢰도의 차이가 크고, 계측기의 유지관리 문제가 발생의 여지가 많다고 할 수 있다.

이에 반하여 외국의 계측기술은 오래된 기술력 축적과 전 세계 현장을 대상으로 하는 대량생산 시스템으로 계측결과치의 신뢰도가 상당히 높으며, 내구성이 검증된 계측기기를 제공하고 있어 널리 사용되고 있으나 계측기기의 가격이 국내 계측기에 비해 상대적으로 매우 높고, 유지관리시 신속한 대응이 어렵다는 문제점이 있다. 그러므로 계측기기의 성능은 일정기간 동안 시험시공을 통해 성능이 검증되어야 할 것이며, 이를 통해 장기적인 유지관리계측을 보다 효율적으로 수행할 수 있을 것이다.

본고에서 제시된 계측항목은 주로 터널의 콘크리트 라이닝에 대한 변형 위주의 계측이므로 향후에는 기존 항목과 함께 원지반, 외압요인을 동시에 측정하여 터널의 내부 및 외부의 환경조건과 하중변화에 따른 응력분배의 변화와 지보기능의 변화 등을 계측할 수 있는 계측기의 연구가 필요하다.

2) 계측기기의 내구연한 및 설치 후 보증

한국도로공사에서 연구한 '특수교량의 계측 시스템 구축과 시공방법 개발 연구 (1997)'의 결과에 따르면, 계측기기의 내구연한은 매립식의 경우 반영구적으로 최소 30년 이상, 부착식 및 노출형인 경우에는 최소 10년간 내구연한이 보증되어야 하는 것으로 나타났다.

흔히 계측기기에 대한 내구연한은 보증기간 동안의 정

상 작동율 (정상/손망실)로 표현되는데, 이것은 계측기기 자체의 성능과 내구성, 설치 기술자의 수준, 시공시 후속공정의 철저한 관리여부, 계측기기의 유지관리 기술 수준과 투자비 등에 따라 커다란 차이를 나타내므로 계측기의 가격보다는 계측기술의 수준이 높은 업체의 참여가 더욱 중요하다고 생각된다.

매립식 계측기의 경우 약 10~20% 정도의 여유율을 고려한 설치가 필요하다. 실제로 지하철 2기 1단계 및 2단계 구간의 경우 구간별 정상 작동율이 55~65% 수준에 밖에 되지 않는 것을 보면 내구연한의 중요성이 매우 크다는 것으로 알 수 있을 것이다.

계측기기의 무상 보증 기간은 다른 전기·전자제품과 같이 1년을 유효기간으로 하고 있으나, 이 기간은 시험시공 기간에 불과하므로 별도의 보증기간 설정이 필요할 것으로 판단된다. 국내 경부고속철도의 유지관리계측을 살펴보면 최종 준공일로부터 최소 3년간을 계측기기의 보증기간으로 적용하고 있다. 지하철의 경우에는 당초 토목구조물에 준하여 하자담보기간인 5년을 적용하였으나, 유지관리기간 중의 손망실에 대한 계측기 설치업자와 구조물 시공업체 및 유지관리계측 담당자간의 의견차이로 분쟁이 지속되고 있는 실정이다. 특히 외부 충격 등에 의한 손망실인 경우에는 그 책임의 한계가 불분명하므로 이에 대한 업체 및 관리주체간의 분쟁은 기술적인 문제를 벗어나 법적인 해결방안이 필요한 실정이라 할 수 있다.

3) 유지관리계측의 운영방법 선정

계측 시스템의 구성은 운영방식에 따라서 크게 수동계측 및 자동계측으로 구분할 수 있다. 이것은 유지관리계측의 경제성, 효율성, 신뢰성 및 계측자료의 관리수준 등에 따라 유지계측 설계시에 종합적으로 고려되어야 할 사항으로서, 이 같은 검토 없이 무조건적으로 '자동' 또는 '수동'식으로 선정되는 운영방법은 계측시스템의 유지관리에 있어서 매우 비효율적인 결과를 초래하게 된다.

일례로서, 수동계측 시스템의 경우에는 계측자료의 획득과 자료처리에 많은 시간과 인력이 소요되므로 구조물의 평가에 따른 최적의 안전조치 시기를 놓칠 우려가 있다. 따라서 이 경우에는 실제계측이 필요한 구간의 선정이 매우 중요하며, 이 구간에 대해서는 자동계측을 계획

하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

4) 계측의 신뢰성 유지 및 법적 보완

유지관리계측에 있어서 신뢰성의 보장과 연속성의 유지는 시설물 계측관리에 있어서 가장 중요한 사항이다. 계측관리기술의 발전을 도모하기 위해서는 유지관리계측의 연속성이 유지되어야 하며, 이를 위해서는 관련 법규의 검토와 합리적인 시행이 뒷받침되어야 한다. 계측설계를 포함한 각종 계측관련공사 및 관련도서의 검토, 계측기기의 품질 및 검교정 상태 확인, 계측시스템 설치현장 점검, 설치 완료 후 초기치 측정 확인, 계측시스템의 시험운영 평가 및 문제점 해결방안, 계측관리의 인수인계시 필요한 사항 등에 대한 보완을 통해 향후 계측시스템 구축 및 운영수준의 향상을 도모하여야 한다.

3.3.3 계측기의 설치 및 운영시 문제점 및 개선방향

계측의 계획 및 설계가 최적화되어 현장에 적용되었다면, 그 다음 문제로는 계측기의 설치 및 운영 단계에서 발생할 수 있는 문제점 및 그에 대응하는 대책이 필요하다.

본 절에서는 유지관리계측의 사용되는 계측기를 크게 매립식과 부착식으로 나누어 검토하였으며, 실제 유지관리계측 시스템의 운영시 발생하는 문제점 및 해결책을 살펴보면 다음과 같다.

1) 매립식 계측기기

① 종류

토압계, 간극 수압계, 철근 응력계, 콘크리트 응력계 등

② 문제점

매립식은 설치 후 육안의 관찰이 어렵게 됨으로 설치된 계측기기에 대한 유지관리시 많은 어려움이 예상된다. 매립식의 문제점을 나열하면 다음과 같다.

- 계측기 설치 후 초기값 선정시기 결정의 어려움
- 센서의 설치시 무재하 상태의 기준점이 제조사 표준값과 일치하지 않거나, 현장검정 및 보정 미비로 인한 신뢰도 저하
- 계측기기의 노이즈 제거를 위한 접지 방법 미비
- 누수 등에 대비한 방수형 계측기기 선택 곤란
- 콘크리트의 건조수축 및 온도차에 의한 변형률 측정

사항

- 콘크리트 재료의 물성시험 미 실시에 따른 응력값의 환산 곤란

③ 대책방안

- 계측기기 제작사의 검정표 입수로 사전 계측센서 상수 값 및 초기값 관리
- 계측기기의 검교정 성적서 제출 의무화 및 많은 경험의 전문기술자에 의한 계측기의 설치
- 최초 설치 후 반드시 여러 차례 측정에 의한 정확한 초기치 선정
- 계측 기기별 접지 및 차폐 실시 확인
- 계측기기의 내구성 시험 및 적정 합격 수준 결정 (터널 내 물청소, 가벼운 충격 등에 의한)
- 터널내 공급전기 품질에 따른 정전압 장치의 설치 여부
- 콘크리트 재료의 물성시험값 입수로 정확한 응력값 확보
- 콘크리트의 건조수축 및 온도에 의한 변형률 확보

2) 부착식 계측기기

① 종류

전기저항식 변위계, 광섬유 변위계, 균열계, 기울기계 등

② 문제점

부착식은 설치 후 육안의 관찰이 가능하므로 설치된 계측기기에 대한 유지관리가 편리한 장점이 있으나, 외부로 노출되어 미관상 좋지 않고, 외부충격 등에 의하여 손상실이 예상된다.

부착식의 문제점을 나열하면 다음과 같다.

- ▶ 전기저항식 센서
 - 습기에 매우 취약하므로 그로 인한 손상실률이 높다.
- ▶ 광섬유 센서
 - 터널 내공에 부착된 센서의 길이에 대한 변형량을 측정함으로써 해당 길이에 대한 실제 변위를 산정하기에 어려움이 있다.
 - 외국사의 기술의존도가 높으며, 운영 SW가 고가이다. 특히 센서에 이상 발생시 문제해결 기간이 길어질 수 있다. 기타 다음 사항은 매설식과 같다.
 - 센서의 설치시 무재하 상태의 기준점이 제조사 표준값과 일치하지 않거나, 현장검정 및 보정 미비로

인한 신뢰도 저하

- 계측기기의 노이즈 제거를 위한 접지 방법 미비
- 누수 등에 대비한 방수형 계측기기 선택 곤란
- 콘크리트의 건조수축 및 온도에 의한 변형률 측정 사항
- 콘크리트 재료의 물성시험 미 실시에 따른 응력값의 환산 곤란

③ 대책방안

- ▶ 전기저항식 센서
 - 보다 완벽한 방습 및 방수 처리 실시
 - 습기에 강한 진동현 센서의 사용
 - 터널 내 누수시 센서 및 자동화 시스템에 대한 방수 개념의 보완 장치 필요
- ▶ 광섬유 센서
 - 외국 기술 도입시 기술이전 및 운영 프로그램의 통 신규약 등을 공개 받아 향후 호환성 확보
 - 광섬유 센서 대체의 내공변위계 검토 필요

3) 유지관리계측 시스템의 운영시 문제점 및 대책

① 문제점

유지관리계측의 운영은 계측 전문가에 의한 계측관리가 우선 되어야 하나, 일반적으로 인원 및 조직의 미비로 계측을 위한 계측이 행해지고 있는 실정이다. 유지관리 계측 시스템의 운영시 발생하는 문제점을 살펴보면 다음과 같다.

- 유지관리계측 전문가 및 조직의 부재
- 획득된 유지관리계측 자료의 DB화 부족
- 유지관리계측 시스템의 유지관리를 위한 절차 및 지침 부재

② 대책방안

유지관리계측 시스템의 구축에 있어서 가장 중요한 것은 그 시스템을 효율적으로 운영할 수 있는 조직 및 인원에도 불구하고, 대부분의 터널 계측시스템의 운영이 유지관리계측 전문가의 확보 없이 단순 계측관리만을 수행해 왔다는 점은 커다란 문제가 아닐 수 없다. 이러한 조직 및 운영인원에 대한 문제가 먼저 해결된 후 계측분

석 시스템과 상태평가 시스템의 개발에 대한 연구가 이루어져야 할 것이며, 이것의 실제 현장 적용 여부에 따라서 효율적인 유지관리계측 시스템의 확대에 이어질 것으로 판단된다.

- 유지관리계측 시스템의 운영을 위한 조직 및 인원 확보
- 유지관리계측의 효율적인 운영을 위한 전산 H/W 및 S/W 이용 및 DB 구축
- 유지관리계측 시스템의 유지관리를 위한 절차 및 지침 작성

4. 터널 유지관리계측 효율화 방안

1) 터널 유지관리계측 평가등급 선정

터널 유지관리계측 기술에서 문제점중의 하나는 무분별한 계측기술의 도입과 적용에 있다. 이러한 문제는 최근 T/K 설계에서 볼 수 있듯이 매우 심각한 상황에 있다고 할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 계측이 필요한 어떤 터널에 어느 정도 수준의 유지관리계측 기술을 적용할 것인지에 대한 관리지침이 만들어져야 할 것이다.

지금까지는 터널의 안전등급 (상태평가 및 안전성 평가)에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 어느 정도 체계화되어 터널구조물에 대한 안전점검 및 안전진단결과를 통하

여 터널에 대한 안전등급 (A, B, C, D, E 5등급)이 구분되어 이 등급에 따라 보수·보강여부가 결정되고 실시되고 있다.

본 연구에서는 터널상태에 대한 구조적 안전성, 교통량 등을 감안한 시설물로서의 중요성, 그리고 변형, 붕괴 사고와 같은 장기적인 위험성 등과 같은 요소를 종합적으로 고려하여 터널에 대한 유지관리계측 시스템의 정도를 결정할 수 있는 평가등급을 제안하였다. 표 4는 터널 구조물의 유지관리계측 평가등급 (안)을 보여준다.

본 기준은 구조적 안전성에 대한 터널 상태평가 또는 안전성 평가등급을 이용하고 교통기능으로서의 터널 중요성 그리고 지진, 지형, 지질과 같은 지질재해요소 (Geological hazard)를 고려하여 평가하도록 하였다. 각각의 평가등급에 따라 계측시스템을 선정하도록 하여 터널 유지관리계측의 효율화를 기하도록 하였다. 그러나 본 평가등급은 평가요소의 선정과 평가등급방법 등에 대한 전문가의 검증과 지속적인 보완 연구가 필요하다고 판단된다.

2) 터널 유지관리를 D/B 구축

터널구조물은 지반 중에 건설되는 지중 (지하)구조물로서 지반의 불확실한 요소를 포함하고 있는 복합구조물이라고 할 수 있다. 따라서 터널 유지관리계측에서의 지

표 4. 터널 유지관리계측 평가등급 (안)

유지관리계측 평가등급	안전성	중요도	위험성	계측시스템	관리
I	•상태등급 A, B	•중요도 낮음	•거의 없음	•육안관찰	필요시
II	•상태등급 C	•보 통	•경미함	•수동계측	정기적
III	•상태등급 D	•중 요	•진행되면 위험	•반자동계측	주기적
IV	•상태등급 E	•매우 중요	•위험	•자동계측	상 시
비 고	1) 터널의 안전성평가는 시설물의 점검 및 안전진단지침(터널)의 터널상태등급 A, B, C, D, E 로 구분하여 정한다. 2) 터널의 중요도는 교통량, 주변도로와의 연계성, 우회도로 여부 등을 고려하여 정한다. 3) 터널의 위험성은 지형, 지질, 지진, 주변환경 등과 같은 지질재해요소를 고려하여 정한다. 예를 들면 해·하저터널, 활성단층인접터널인 경우에는 위험성이 매우 큰 경우에 해당한다. 4) 유지관리계측 평가등급은 위의 세가지 요소를 종합적으로 고려하여 유지관리기관의 최종적인 판단하에 결정하도록 한다. 5) 터널설계시 유지관리계측 기술은 터널 상태등급이 매우 양호한 것으로 보아 터널의 중요도와 위험성으로 평가하여 설계에 반영하도록 한다.				

반조건, 터널설계, 시공상태 등에 대한 자료가 거의 없는 실정에서 단지 계측결과로부터 터널의 안전성을 평가하는 것만큼 어려운 것이 없다.

기 시공된 터널에 대한 안전진단 및 유지관리 업무시 지반자료, 설계자료, 시공자료에 대한 조사가 매우 어려운 실정으로 계측자료를 포함한 많은 조사·시험자료들이 불명확한 설계 및 시공조건으로 인하여 명확하게 평가되지 못하고 있는 상태이다. 터널의 효율적인 유지관리를 위해서는 계측결과의 공학적 평가가 중요하다고 할 수 있다.

따라서 터널별로 유지관리용 D/B를 구축하도록 하여 터널의 유지관리계획에 대한 기본적인 필수자료를 제공하여야만 유지관리계획의 효율성이 증가될 수 있다고 할 수 있다. 유지관리용 D/B에는 지반조사자료, 설계자료, 시공자료, 보수·보강자료 등이 모두 포함될 수 있도록 하고 보고서뿐만 아니라 사진, 도면 등도 포함하도록 하고 이를 D/B 화하여 컴퓨터에 보관하도록 해야한다.

이를 위해서 별도의 터널 유지관리용 D/B 프로그램을 이용하는 방안이 있을 수 있으며, 최근 이용이 활발하게 진행되고 있는 GIS 기술, 정보화기술 등의 다양한 기술을 활용하면 보다 효과적으로 이를 구축할 수 있다고 생각된다.

3) 터널 유지관리계획 기술의 검증 및 표준화

현재 국내터널에 적용되는 유지관리계획 기술은 첨단 계측기술의 시험장이라고 하고 과언이 아니다. 특히 검증이 되지 않은 외국계측기술을 도입하여 많은 시행착오를 겪으면서 터널에서의 유지관리계획의 정확한 목적을 상실한 채 단지 자료획득에 신경을 쓰고 있지만 중요한 것은 의미 없는 자료를 얻는 것이 아니라 어떠한 자료를 얻느냐하는 것이라고 생각한다.

이는 터널구조물에 대한 적용성이 검증되지 않은 상태에서 자동화 계측만을 강조하면서 나타나는 현상으로 각각의 계측기술이 갖는 측정항목이나 정밀도 그리고 공학적 평가에 대한 체계적인 검증이 필요하다고 생각한다. 이를 위해서는 터널구조물의 제반특성을 고려하여 반영할 수 있는 계측기술에 대한 검증작업이 다양한 실험과 해석작업을 거쳐 만들어져만 한다.

현재 계측기술자체는 최신전자통신기술의 발달로 어

는 정도의 수준에 도달한 상태이다. 이제 필요한 것은 이러한 계측기술을 지하구조물인 터널구조물에 적용할 수 있는지 그리고 적용하여 나타난 결과가 단지 구조물의 거동감시 수준인지 아니면 구조물의 공학적 거동평가 인지를 명확히 하여야 할 것이다.

또한 계측목적에 적합한 계측기술자체를 장기적인 관점에서 표준화하는 방안도 고려해야 할 것이다. 이는 현재 단발적이고 일시적인 유지관리계획 기술을 보다 체계화할 수 있으며 통합화할 수 있는 토대가 될 수 있을 것이라 판단된다.

4) 터널 유지관리계획 자료 분석의 체계화

현재 유지관리계획이 실시되고 있는 서울지하철이나 고속철도의 경우 매시간마다 수많은 계측자료가 축적되고는 있지만 과연 이렇게 많은 계측자료가 공학적으로 어떤 의미가 있고 터널의 안전성과 어떤 상관성이 있으며, 장기적으로 어떤 변화가 예상되는지에 대한 체계적인 분석이나 고민이 부족한 실정이다. 이러한 과정의 반복은 유지관리계획의 효율성과 필요성에도 불구하고 유지관리계획이 꼭 필요한가에 대한 의문을 제기하도록 했으며, 유지관리주체에서도 문제에 대하여 어려움이 있는 것이 사실이다.

즉 다시 말하면 계측기술은 최신 기법으로 쉽고 빠르게 다양한 계측항목의 자료가 실시간으로 끊임없이 축적되고 있지만 이를 효과적으로 분석하고 공학적으로 판단하는 작업은 그만큼 부족하고 잘 안되고 있음을 의미하고 있다. 이는 터널설계가 명확한 설계하중으로부터 만들어지는 것이 아니고 경험적인 요소가 많기 때문에 터널구조물에 어떤 변화가 왔을 때, 터널변상의 원인이 구조적인 문제 즉 지반하중(외력)의 문제인지 그리고 어떤 종류의 외력이 어떤 방향으로 작용하고 있는지를 판단하기가 대단히 어렵기 때문이다.

현재의 유지관리계획 기술은 최신기술을 이용하여 라이닝의 변위나 변형상태를 실시간 단위로 매우 정밀한 단위까지 측정할 수 있는 수준까지 이르렀지만, 이를 소화할 수 있는 공학적인 분석체계가 아직은 부족하기 때문에 유지관리계획 기술이 효과적으로 사용되지 못하고 있다고 판단된다.

유지관리계획 기술의 최종목표를 터널의 변위나 변형

거동의 정량적인 실시간 모니터링이라고 한다면 계측기술에 대한 연구보다는 계측자료의 공학적 분석과 평가방법에 대한 연구가 선행되어야 한다. 즉 터널공법별, 지반조건별 등에 따라 복합적인 터널 거동에 대한 실험적 해석적 연구가 이루어짐으로서 계측자료의 정확한 평가방법이 만들어 질 수 있으며, 계측자료의 공학적 평가분석방법이 만들어져야만 유지관리에서 필요한 계측관리기준이 만들어 질 수 있는 것이다.

따라서 터널별로 터널 유지관리계측 기술의 적용목적이 터널 거동의 공학적인 평가인지 아니면 터널구조물의 변화상태를 일정한 간격으로 감시인지를 명확히 하여, 적용목적에 맞는 계측시스템을 적용하도록 하는 것이 바람직하다고 판단된다.

5) 터널 유지관리계측 통합화 방안 수립

현재 터널 유지관리계측에 대한 최신기술의 지속적인 도입은 계측기 및 계측분석 S/W의 호환성이 확보되지 않는 상태에서 설계나 시공주체에서 무분별하게 적용되고 있다. 이는 최근 T/K 설계에서 심화되고 있으며, 이러한 문제를 방지할 경우 향후 터널 유지관리계측 업무의 비효율성을 야기하여 상당한 지장을 초래할 것으로 예상된다.

따라서 터널 유지관리계측 기술에 있어서 H/W인 계측기에 대한 일률적인 적용은 어렵다고 하더라도 계측자료를 처리 분석하여 터널의 안정성을 모니터링 하는 S/W에 대한 기술적 통합은 가장 먼저 해결할 과제인 것이다.

최근 대부분의 터널설계에서는 종합적인 터널유지관리시스템 (Tunnel Management System)이 적용되고 있다. 그러나 이를 자세히 살펴보면 이에 대한 구체적인 방법이나 운영방안에 언급은 전혀 없는 실정으로 단지 '이렇게 하면 되겠다'라는 개념수준에 불과하다고 할 수 있다.

이러한 터널 유지관리시스템 (TMS)의 선결문제중의 하나는 바로 계측자료를 처리, 분석하는 S/W의 호환성이 확보되어야 하며, 유지관리주체별로 이에 대한 통합화가 이루어져야 효율적인 터널유지관리가 이루어질 수 있다고 할 수 있다.

5. 결론 및 향후과제

터널에 대한 유지관리계측은 공용중인 터널에 대한 유지관리 차원의 안정성 확보를 위해 점차 그 중요성이 더해지고 있어 터널 유지관리의 필수적인 항목으로 자리잡고 있으나 실제적으로 투자되는 계측비용과 기술자들의 노력에 비하여 계측결과의 활용도는 매우 낮은 실정이다. 이것은 합리적인 계측을 위한 분석기법 및 관리기준이 정립되어 있지 않고, 단순히 계측 활동 자체에만 만족하는 관리자의 안이함에 기인한다고 할 수 있다. 또한 유지관리계측을 통하여 얻어지는 터널에 대한 내구성, 공용성 및 안정성 분석기술의 개발이 절실히 요구됨에도 불구하고 아직까지 이에 대한 뚜렷한 연구결과가 없다는 현실이다. 그러므로 효과적이고 경제적인 터널 유지관리계측의 적용을 위해서는 계측자료의 분석 및 터널의 건전도 평가기법, 계측 관리기준의 정립 및 효율적인 시스템 구성 등에 대한 폭넓은 사전 연구가 선행되어야 할 것으로 생각되며, 이러한 유지관리 계측기술은 다음과 같은 요소기술들의 확보를 통해 가능하므로 향후 지속적으로 추진되어야 할 과제라 할 수 있다.

1) 대상 구조물의 선정 및 관리기준

- 계측 항목별 관리기준 선정 연구
- 터널 유지관리계측 평가등급 연구
- 계측에 의한 터널 라이닝 안전성 평가 기준 정립

2) 계측시스템의 계획 및 관리

- 최신 계측기술의 현장 적용성 및 활용도 평가연구
- 시공중 계측과 유지관리계측의 효율적인 연계방안
- 도로 터널의 유지관리계측 시방

3) 계측시스템의 운영 및 표준화

- 계측자료의 효율적인 분석 및 해석에 관한 연구
- 계측시스템의 유지관리 방안
- 계측시스템의 S/W 및 H/W상의 통합 및 표준화 연구

참고문헌

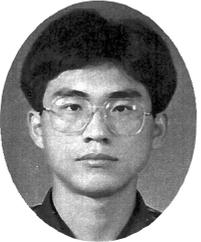
1. 건설교통부, '터널표준시방서', 1999.
2. 김성곤, '구조물 모니터링 시스템의 개발', 한국강구조학회지 Vol.7, No.4, pp.21-24, 1995.
3. 대우건설기술연구소, '터널안전관리를 위한 정밀 안전진단 시스템 개발', 1996.
4. 민덕기, 최성욱, 박명철, '터널의 계측변위를 이용한 역해석기법에 관한 연구', KGS Fall '96 National Conference 서울, 한국지반공학회, 1996.
5. 박성재, 정경환, 안병기, 백원길, '현장 계측기기 사용상 문제점에 대한 고찰', 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.333-336, 1994.
6. 서울특별시 지하철건설본부, '지하철 유지관리계획 연구보고서', 2000.
7. 시설안전기술공단, '안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 -터널편-', 2000.
8. 시설안전기술공단, '터널구조물 상태평가 기준(안) -터널편-', 2001.
9. 우종태, 이송, '유지관리계획에 의한 터널라이닝의 안전성 분석', 대한토목학회 학술발표회논문집, pp.1-4, 2001.
10. 천병식, 남순성, '서울 지하철 터널의 계측관리 기준치에 관한 연구', 대한토목학회지 Vol.16 No.III-1, pp.47-59, 1996.
11. 케이애펀티엘, '고속철도 시험선구간 계측센서 설치 용역 계측기 설치 보고서', 2000.
12. 한국건설기술연구원, '터널구조물 상태평가 자동화 시스템 개발', 2001.
13. 한국건설기술연구원, '터널 유지관리시스템 개발', 2000.
14. 한국건설기술연구원, '터널의 안전진단 체계정립 및 균열자동측정 시스템 개발', 1998.
15. 한국도로공사, '터널관리 국내의 실태조사 및 유지관리 효율화방안 연구', 2001. 12.
16. 한국철도기술연구원, '고속철도 선로구축물 성능확보를 위한 구조물 계측 및 평가시스템 개발(I)', 1998.
17. 한국철도기술연구원, '고속철도 선로구축물 성능확보를 위한 구조물 계측 및 평가시스템 개발(II)', 1999.
18. Curtis.D. J, Spaul.J. A, 'Monitoring of the UK Tunnel Linings', Engineering Geology of The Channel Tunnel, pp.277-286, 1996.
19. Eisetein.Z, Nahhas.F.EI and Thomson. S, 'Pressure Displacement Relations in Two system Tunnel Lining', Proceedings of 6th Pan American Conference on Soil Mechanics, pp.85-948., 1979.
20. Maeda,K. & Obata,T, 'The Measurement of The Behavior at The Undersea Portion of The Seikan Tunnel', トンネル工學研究發表會 論文集2卷, pp.143-148, 1992.
21. Moore.D.R & A. Crease, 'Tunnel Instrumentation', Engineering Geology of the Channel Tunnel, pp.287-294, 1996.
22. Nahhas.F.EI, Kadi.F.EI and Ahmed.A.I, 'Interacting of Tunnel Linings and Soft Ground', Tunnelling and Underground space Technology, Vol. No.1, 1992, pp.33-43, 1992.



백기현
대우건설 기술연구소 선임연구원
guyber@mail.dwconst.co.kr



오영석
한국시설안전기술공단 부장
oys8565@kistec.or.kr



김용전
한국도로공사 과장
kjjeon@freeway.co.kr



김영근
삼보기술단 지반부 이사
babokyg@hanmail.net

K C I