

도심지터널에 적용되고 있는 유지관리 계측시스템과 안전관리기준



우 종 태
경북대학 건설환경정보과 교수
(jtwoo@kyungbok.ac.kr)

1. 도심지터널의 유지관리계측 개요

1.1 도심지터널의 유지관리계측 목적

도심지터널에서 유지관리계측은 구조물 완공 후 공용기간 중에 주변지반의 변화와 영향으로 인하여 발생하는 배면지반, 토압 및 수압의 변화와 콘크리트 구조물의 변화 양상, 환경조건 등을 측정하여 터널의 안전성을 확인하는데 있다. 또한, 예방적인 유지관리를 실현하기 위한 기본전제 조건으로서 구조물의 안정성 및 건전성을 분석 평가하고 구조성능을 제어하며 공용상태의 실 거동 분석을 통한 구조성능의 개선을 목적으로 수행하는 정기적 또는 상시적 조사행위를 의미한다.

터널에서 공사중계측과 유지관리계측의 수행영역 구분은 그림 1과 같다.

1.2 도심지터널의 유지관리계측 필요성

개착터널(박스)은 토공작업시 다양한 형태의 흙막이계측이 수행되며, 굴착완료후 콘크리트 구조물 시공시는 공사중 계측치의 수렴여부를 확인하고 후속 공사를 진행하게 된다. 그러므로 개착구간은 토공작업시 터널구간에 비해 토목구조물 배면의 지반상태 확인이 용이하고 개착 박스단면의 구조설계에 적용되는 각종 설계입력정수의 변화가 적으므로 유지관리시 불확정적인 요소가 터널구간 보다는 적다고 볼

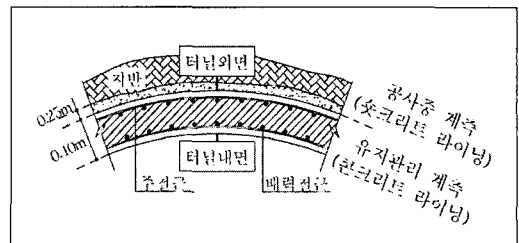


그림 1. 터널에서 공사중 및 유지관리계측 수행영역 구분

표 1. 도심지터널의 유지관리계측 항목 및 내용

계 측 항목	계 측 내 용
토 압	· 터널 라이닝 설계의 적정성 평가 · 지반의 이완영역 확대 여부 및 지반응력의 변화 조사
간극수압	· 배수 터널의 배수기능 저하에 따른 잔류수압 상승여부 측정 · 비배수 터널 라이닝 작용 수압 측정 · 수압에 따른 라이닝의 안정성 확인
지하수위 및 용수량	· 간극수압 측정시의 신뢰성 평가 · 터널 내 용수량과의 상관성 평가
콘크리트응력	· 외부 하중으로 인한 콘크리트 라이닝의 응력 측정 · 콘크리트 라이닝이 구조체로 설계된 경우 라이닝 내부 응력 측정
철근응력	· 외부 하중으로 인한 콘크리트 라이닝내의 철근 응력 측정 · 콘크리트 라이닝 응력 측정 결과의 신뢰성 검증
내공변위	· 외부 하중으로 인한 콘크리트 라이닝의 변위량을 측정하여 터널 구조물의 안전성 판단
균 열	· 콘크리트 라이닝에 발생된 균열의 진행 상태를 측정하여 터널의 안전성 판단
건물경사	· 터널 구조물의 거동으로 인한 지상건물의 기울기를 측정하여 건물의 안전성 판단
지진 및 진동	· 지진발생시 터널 구조물의 안전성 판단 및 열차운행 등에 의한 주변구조물의 진동영향 판단
온 도	· 콘크리트 라이닝의 온도영향 판단

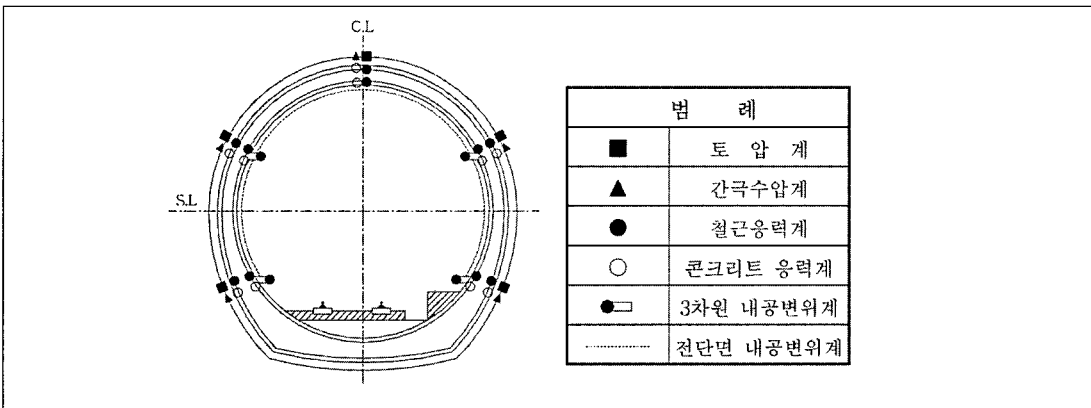


그림 2. 도심지터널 유지관리 계측기의 배치도(5점 배치 예)

수 있다.

개착터널(박스)은 공사완료 후 지중에 있는 상태가 외력의 평형(상재하중, 축압, 양압력 등)으로 인하여 가장 안정된 상태가 되므로 이런 평형상태의 균형이 변할 수 있는 곳에 응력 위주(콘크리트응력, 철근응력)의 유지관리계측을 계획하는 것이 바람직하다.

터널은 대개 환경변화가 적은 지중에 건설되어 구조적으로 타 구조물에 비해 비교적 안전한 것으로 알려져 있어 그동안 다른 토목구조물에 비해 유지관리에 대한 인식이 부족하였다.

그러나 도심지터널 건설기간 중 지반 취약지점, 하천 횡단지점, 기존 지하철, 도시철도, 국철 등의 터

널 통과지점, 고가도로 및 교량 교각 직 하부 통과지점, 도시개발 및 재개발 등으로 근접시공이 예상되는 지역 등과 같은 취약구간은 과도한 지하수위 및 외부하중의 변화, 근접굴착에 따른 배면지반의 이완 등으로 터널구조물에 변위 발생과 응력 변동 등의 장기적 구조물 거동 발생 가능성으로 도심지터널 구조물에 대한 유지관리계측의 중요성이 대두되어 1995년부터 서울지하철 5~8호선 터널구간에 극히 제한적으로 적용되어 지금까지 계측 및 분석이 수행 중에 있으나, 단기간의 축적된 기술과 계측기기적인 문제 및 분석기술수준의 부족 등으로 구조물 이상 거동의 조기파악을 위해 많은 연구와 함께 유지관리계측 관리기준 제정이 시급한 분야이며, 터널표준시방서에는 1999년 개정시 유지관리계측 항목이 최초로 신설된바 있으며, 2007년 현재 터널표준시방서를 개정 작업중에 있다

2. 도심지터널의 유지관리계측 계획

도심지터널에서 유지관리계측의 항목 선정에 있어서는 시공시의 현장여건이 매우 중요하므로 시공 중 터널의 함몰이나 붕괴가 발생한 지역, 1차 지보재의 품질관리가 불량하여 지보재의 재시공이 이루어진 구간, 과다변위 및 응력 발생으로 인해 지보재를 추가로 설치한 구간, 성토 절토 등 외력조건이 크게 변화하는 구간, 인접구조물과 근접 시공구간, 장기 변형이 예측되는 지반 등에 주로 유지관리 계측기기가 설치된다.

계측항목 선정시 터널의 용도 및 크기, 방수와 배수 형식, 터널 지보재의 재료적 특성, 지질상태 및 지하수 조건, 하중재하 조건 및 응력 상태, 주변 환경

및 유지관리여건 등을 고려하여 결정하고, 내구성이 검증 또는 확인된 경우 공사중 계측기기를 유지관리 계측기기로 전환하여 지속적으로 장기계측이 수행 되도록 하는 것이 가장바람직하다.

터널은 특성상 원지반의 변위와 하중이 굴착된 터널 내부로 작용하므로 굴착단계인 공사중계측에서 각종 변위(내공변위, 지중변위, 록볼트인발 시 하중-변위 관계)와 침하(지표침하, 천단침하, 지중침하), 지보재의 응력 및 축력(숏크리트응력, 록볼트축력)을 측정하여 굴착완료 후 각종 계측치의 수렴여부를 확인한 후에 면정리 및 방수작업, 콘크리트 라이닝이 시공된다. 유지관리계측 단계에서는 시공중에 원지반의 변위와 하중이 거의 수렴되었기 때문에 터널 공용중에 추가적인 원지반의 변위와 작용하중은 크게 발생하지 않을 것으로 예상된다.

따라서 도심지터널의 유지관리계측은 원지반에서의 계측항목이 중요한 것으로 판단되며, 터널에서 유지관리계측 적용 우선순위는 숏크리트에 근접된 원지반의 작용하중(토압, 간극수압 등) 측정, 콘크리트 라이닝의 철근응력과 콘크리트응력 측정, 표면부착식 내공변위 측정의 순이다.

그림 2는 도심지터널에서 수행되는 각종 유지관리계측 항목들을 나타낸 것이며, 터널의 크기(단선, 복선, 유지선, 정거장 터널 등), 터널연장이 긴 경우에는 공구별로 유지관리계측의 중요 우선순위, 계측기기의 종류별 손상실률 등을 종합적으로 고려하여 합리적으로 단면당 계측항목별로 계측지점수를 결정하여야 한다.

예를 들면, 그림 2와 같이 복선터널 이상의 단면인 경우 철근 및 콘크리트의 응력을 측정하는 매립식 변형률계는 콘크리트 라이닝 외측과 내측에 단면당 5점 [변형률계 총20개: 철근용 10개=5점에 설치×2

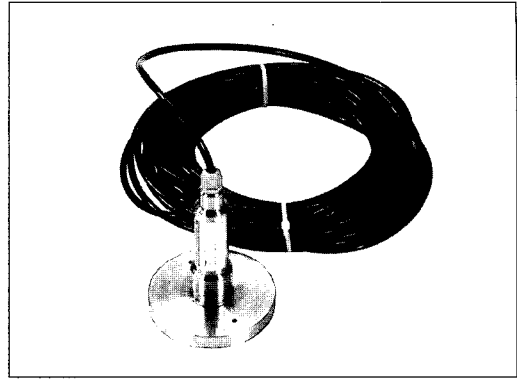
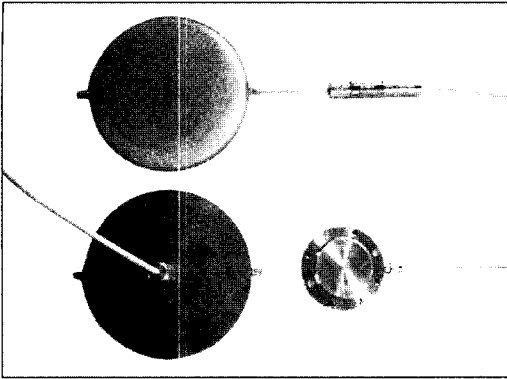


그림 3. 토압계

개(외측, 내측 각 1개), 콘크리트용 10개=5점에 설치 ×2개(외측, 내측 각 1개))에 설치하고, 매립식인 토압계와 간극수압계는 3점인 천단부와 어깨부[토압계와 간극수압계 각 3개]에 설치하고, 콘크리트 라이닝 표면에 부착하는 내공변위계는 선택적으로 적용할 수 있다. 표 1은 도심지터널 유지관리시 수행되는 계측항목 및 계측 결과로부터의 판단내용을 나타낸 것이다.

3. 도심지터널의 유지관리계측 항목

3.1 토압 측정

토압 측정의 목적은 원지반에서 터널 라이닝으로 작용하는 토압의 변화를 측정하여 간접적으로 배면 지반의 거동과 압력을 파악하기 위한 계측으로 간극수압과 상호보완적으로 측정 및 관리되어야 하며, 터널 해석시 이론적으로 적용한 토압의 적정성을 판단한다. 사용계측기는 토압계를 사용하며, 설치 및 측정은 토압계 설치 위치를 평평하게 면고르기를 한 후 감지부가 토압 작용방향에 수직을 이루도록 설

치한 후 고정시킨다. 설치 완료후 지시계인 Indicator 및 Readout 장비를 이용하여 초기치를 측정하고 측정빈도 및 현장여건에 따라 수시로 수동 및 자동계측을 수행한다.

터널구조물인 경우 배면 지반의 거동은 굴착후 응력 재분배 현상에 의하여 서서히 안정화되며, 그 거동이 수렴되었을 때 콘크리트 라이닝이 시공된다. 이때 토압계는 콘크리트 라이닝 시공에 앞서 원지반과 쏘크리트 라이닝 사이에 설치되고, 그 이후부터 터널 라이닝에 작용하는 토압을 측정하여 구조물의 안전성을 확인하고 관리함으로써 간접적으로 배면 지반의 거동 및 압력을 파악하기 위해 설치되며 내구성이 좋은 진동현식 센서를 사용해야 하며, 토압계는 그림 3과 같다.

3.2 간극수압 측정

간극수압은 흙의 간극 속에 존재하는 물의 압력을 의미하며, 간극수압 측정의 목적은 터널 라이닝에 작용하는 지하수위 변화에 따른 간극수압을 측정하여 터널 해석 시 적용한 간극수압의 적정성을 판단한다. 즉, 터널 라이닝 배면의 작용하중 증가여부 및

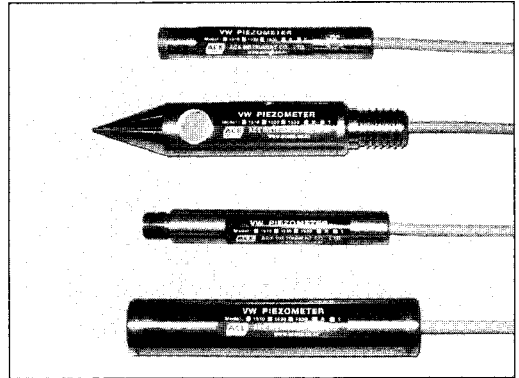
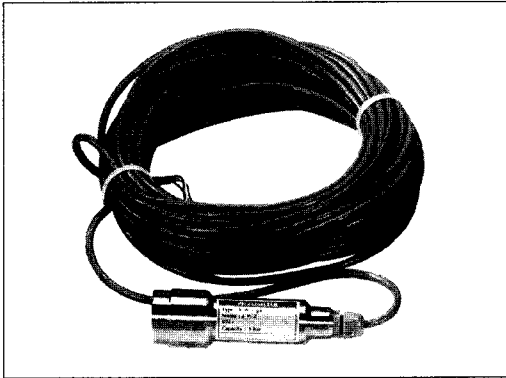


그림 4. 간극수압계

배수기능 저하에 의한 간극수압 상승여부를 확인한다. 사용계측기기는 간극수압계를 사용하며, 설치 및 측정 시 간극수압계 내부에는 공기압이 작용되지 않도록 설치 전에 필터를 최소 24시간동안 수침시켜 필터내부의 공기를 완전히 제거하여야 하며, 초기치를 측정하고 설치 전 영점 값과 작동상태를 확인해야 한다. 측정은 측정빈도와 현장여건에 따라 수시로 수동 및 자동계측을 수행한다.

터널구조물인 경우 배면지반의 거동은 굴착 후 응력 재분배 현상에 의하여 서서히 안정화되며, 그 거동이 수렴되었을 때 콘크리트 라이닝이 시공된다. 이때 간극수압계는 콘크리트 라이닝 시공에 앞서 원지반과 숏크리트 라이닝 사이에 설치되고, 그 이후부터 지하수위 변화에 따른 간극수압을 측정하여 배면 지하수의 거동 상태 및 라이닝에 작용하는 간극수압을 파악하기 위해 설치되며 내구성이 좋은 진동현식 센서를 사용해야 하며, 간극수압계는 그림 4와 같다.

3.3 콘크리트 라이닝 응력 측정

콘크리트 라이닝의 응력을 파악하기 위해 매립식

또는 표면부착식 변형률계인 Strain gauge를 설치하고, 설치 위치별로 변형의 차이를 측정하여 콘크리트 라이닝의 응력을 파악하고, 이 값과 허용응력과의 비교로 터널 구조물의 안전성을 판단한다.

사용계측기기는 변형률계를 사용한다. 설치 및 측정은 콘크리트 라이닝의 철근배근이 완료된 후 강철막대에 변형률계를 고정시킨 후 기 배근된 철근 사이에 견고하게 고정시킨다. 연결케이블로 계측센서를 연결하여 지시계로 초기치를 설정하고, 측정빈도와 현장여건에 따라 수시로 계측을 수행한다.

콘크리트 구조물 내부에 발생하는 콘크리트 응력 및 철근 응력을 측정하기 위해 매립식 변형률계를 설치하고, 부위별 변형의 차이를 측정한다. 변형률이란 단위길이당 신장량의 개념으로 대부분의 구조용 재료는 응력-변형을 관계에서 재료가 탄성적, 선형적으로 거동하는 초기영역을 갖는다.

변형률은 무차원량이므로 탄성계수 또는 응력의 단위와 같으며, 응력과 변형률과의 관계에서 구조물에 있어서 변형에 관련된 콘크리트 내부에 발생하는 응력을 구할 수 있다. 콘크리트 응력은 측정된 응력과 콘크리트의 허용응력과의 비교로 구조물의 안전성을 파악할 수 있으며, 철근 응력은 측정된 응력과 허

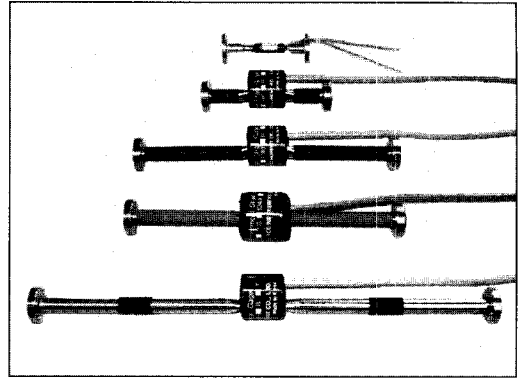
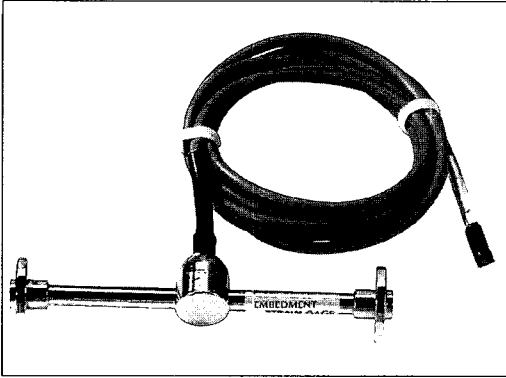


그림 5. 변형률계

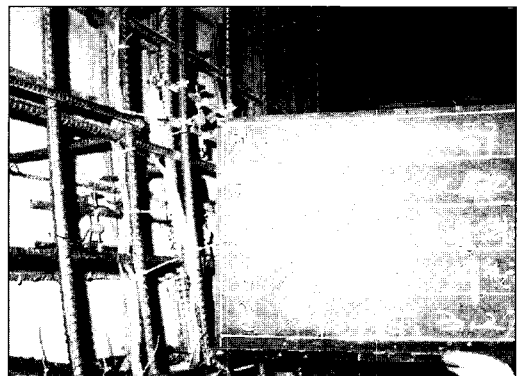


그림 6. 변형률계 설치 전경(터널 내측, 외측)

용응력과 비교로 구조물의 안전성을 파악할 수 있다. 콘크리트 라이닝의 응력 및 철근 응력산출에서 변형률계로 측정되는 총변형률 (ϵ_{total}) = 탄성변형률 (ϵ_e) + Creep 변형률(ϵ_{cr}) + 건조수축(ϵ_{sh}) + 온도변화(ϵ_t) 로 표시되며, 외부하중에 의한 순수 변형률 (ϵ_c) = $\epsilon_{total} - (\epsilon_{sh} + \epsilon_t)$ 로 표시된다. 여기서, ϵ_{sh} 와 ϵ_t 는 무응력 변형률계로 측정하며, 콘크리트 양생과정인 7일 이내에서 약 1Mpa (10kgf/cm²)의 콘크리트 응력이 발생된다.

변형률계의 종류는 진동현식(표면 부착형, 콘크리트 매립형, 철근 부착형 등), 전기 저항식, 광섬유 변

형률계, 기계식 등이 있으며 각각의 특징은 다음과 같고, 그림 5와 같다.

- ① 진동현식(Vibrating wire type) 변형률계의 특징은 열악한 환경에서 원격 및 자동계측에 적합하다. 전기저항식에 비해 고가이며, 일반적으로 동적 계측이 어렵다.
- ② 전기저항식(Electrical resistance type) 변형률계의 특징은 환경조건에 따른 실패율이 높고 리드선(Lead cable) 효과로 인해 원격 계측에 부적당하며, 단기간 동안의 동적계측에 주로 사용되고 있다.

- ③ 광섬유 센서(Fiber optical strain gauge sensor)의 특징은 정밀도가 높으며, 동적 측정과 장기 계측이 동시에 필요한 원격 자동계측, 전자장치의 영향이 심한 곳에 적당하나 매우 고가로 특수한 구간에 선택적으로 적용하고 있다.

터널에서 변형률계 설치 전경은 그림 6과 같다.

3.4 콘크리트 라이닝 철근응력 측정

콘크리트 라이닝의 철근응력을 파악하기 위해 매립식 변형률계를 설치하고 설치 위치별로 변형의 차이를 측정하여 콘크리트 라이닝의 철근응력을 파악하고, 이 값과 허용응력과의 비교로 터널 구조물의 안전성을 판단한다. 사용계측기기는 변형률계를 사용한다. 설치 및 측정은 콘크리트 라이닝의 철근배근이 완료된 후 측정위치의 철근에 변형률계를 볼트로 완전 고정하거나, 용접으로 완전 고정시킨다. 연결케이블로 계측센서를 연결하여 지시계로 초기치를 설정하고 측정빈도와 현장여건에 따라 수시로 계측을 수행한다.

3.5 콘크리트 라이닝 전단면 내공변위 측정

콘크리트 라이닝의 내공변위를 수평, 수직의 2차원 또는 수평, 수직, 종방향의 3차원 변위를 측정하고, 허용변위량과 비교하여 터널 구조물의 안전성을 판단한다. 사용 계측기기로는 3차원 광파기(Total station), 광섬유 센서(Fiber optical strain gauge sensor), EL Beam Sensor, BCS(Basset Convergence System), DTL(Dongwoo Tunnel Lining system), TPMS(Tunnel Profile Monitoring System) 등이 있다.

3.5.1 3차원 광파기 (Total station)

측지학적 기술을 활용하여 기준점의 위거, 경거, 높이(X, Y, Z)의 절대 좌표계를 이용하여 변위타켓의 수평변위, 침하, 종방향 변위를 계산하는 방법이다. 따라서 광파 측정기를 지하철 구조물 내부에 기준점(Prism) 타켓과 반사경(Bireflex) 타켓을 설치하여 천단침하 및 내공변위를 3차원으로 구조물의 거동량을 측정하여 허용 변위량과 비교함으로써 구조물의 안전성을 파악한다. 최근에는 전자파 거리측정기와 데오돌라이트 기능을 합쳐 임의 지점간의 3차원 위치좌표를 결정하는 방법인 토탈스테이션(Total station)이 개발되어 정밀측정에 이용되고 있다. 그러나 이들 방법은 구조물 내에서의 절대 변위값을 측정하는 것이 아니고 상대변위를 측정할 뿐만 아니라 구조물에 대해 가 기준점을 설치한 후 가 기준점으로 부터 좌표계산을 하는 등의 복잡한 계산을 필요로 하고, 정적인 측정에 한정된다는 단점은 있으나, 활용이 증대되고 있으며, 3차원 광파기의 주요장비는 그림 7과 같다.

3.5.2 광섬유 센서 (Fiber optical strain gauge sensor)

도심지터널 구조물 단면 형상을 따라 종·횡방향 표면에 설치하여 외부하중으로 인한 콘크리트 균열 및 변위를 변형률로 구하여 구조물의 안전성 판단에 사용된다.

측정원리는 광 발진기로부터 빛을 반사하여 돌아오는 광량을 체크하여 광섬유의 길이변화를 파악하므로 광 변형률계와 같은 개념이며, 광섬유 센서의 종류는 다음과 같다.

- 1) 광섬유 센서의 종류

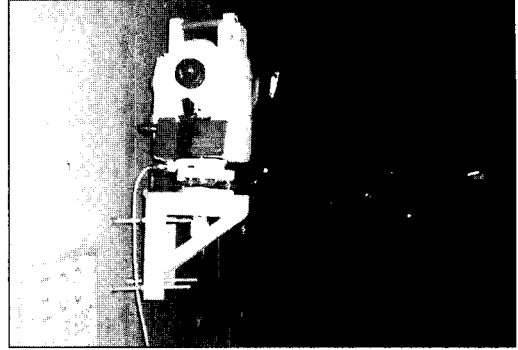
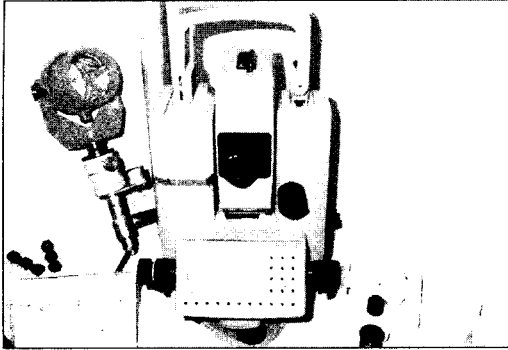


그림 7. 3차원 광파기

① Micro-banding sensor

광량 감쇠법(Light Attenuation Method : LAM)에 근거하며, 일정한 곡률 반경으로 연속적인 교차로 계측대상 물체의 인장·압축 변형 발생시 이에 상응한 단면 축소 및 증대를 야기 시켜 빛의 통과량이 감소하거나 증가된다. 이러한 광량의 변화를 측정하여 변형률을 계산하며, 주로 유럽에서 광범위하게 실 구조물에 사용되고 있고, 서울지하철 5호선 유지관리계측에도 적용된바 있다.

② Bragg-gration sensor

광섬유 일부분의 코어 굴절계수를 주기적으로 바뀌게 만든 것으로 게르마늄의 진한 액체로 처리된 광섬유 내에 Bragg 회절격자를 새겨 넣은 전광 반사법(Holographic method)으로 응력과 변형을 분포를 측정할 수 있다. 주로 북미에서 교량 계측용으로 실 구조물에 적용 중에 있으며, 국내에서는 교량의 균열 발생여부와 균열의 위치, 교량의 수직 처짐을 추정하는 방법으로 실내 실험으로 그 효과를 검증하였고, 실제구조물에 적용하기 위한 연구와 현장적용이 진행되고 있다.

③ Fabry-perot sensor

거울이 설치된 두 개의 광섬유 사이의 간격(Fabry-perot)이 부재의 변형에 따라 변화하는 것을 측정한다.

광섬유 끝단에서 반사되는 빛과 같은 광원이지만 섬유끝단을 통과하여 보호막에 반사된 빛의 위상(Phase)차를 측정하는 원리로 Bragg-grating sensor와 같은 이점을 가진다. 현재 국내에서 실내 실험이 검증되어 실제구조물에 적용하기 위한 연구와 현장적용이 진행되고 있다.

④ Optical Time Domain Reflectometry(OTDR)

광섬유센서를 케이블로 사용하여 수십 km에 수

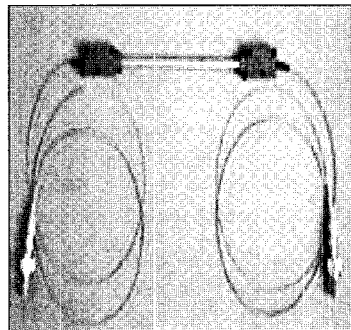


그림 8. 광섬유 센서

도심지터널에 적용되고 있는 유지관리 계측시스템과 안전관리기준

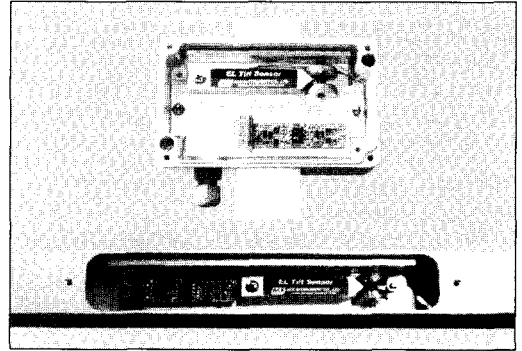
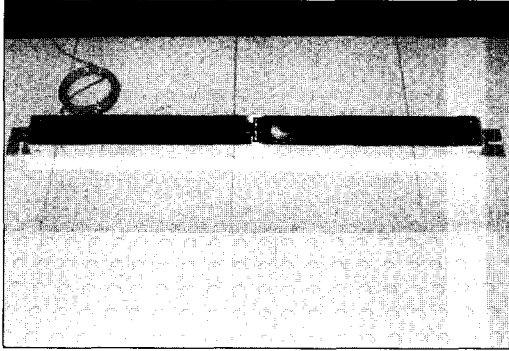


그림 9. EL Beam Sensor 및 전기식 EL Tilt Sensor

백개의 센서를 한 줄의 광섬유로 측정하는 방법이다. 광섬유를 설치한 뒤 한쪽 끝에서 빛의 펄스를 보내고 돌아오는 빛의 시간과 강도를 측정하면 온도와 변형률의 크기를 동시에 측정할 수 있다. 이 방법은 외국에서 Gas pipeline에 적용한 사례가 있으며, 국내에서는 진보된 신기술로 연구와 현장 적용이 진행되고 있다.

광섬유 센서는 그림 8과 같고, 서울지하철 5호선에 적용된 사양은 Micro-banding sensor이며, 현장 여건에 따라 최적의 사양을 적용하여야 한다.

3.5.3 EL Beam Sensor

메탈 빔 센서(Metal beam sensor)에 전해질 기울기 센서(Electrolytic tilt sensor)가 설치된 빔을 구조물에 볼트로 고정시킨 후 구조물에 변형이 발생되면 센서 안에 내장되어 있는 전해액이 충전된 부분에 전압차가 발생되며, 이 전압차를 각도로 환산할 수 있도록 구성되어 구조물의 상대변위와 회전정도를 측정할 수 있다.

수평빔 센서와 수직빔 센서로 구성되어 수평빔 센서는 구조물의 침하와 용기 등을 측정하며, 수직빔 센서는 수평변위와 터널 수렴도를 측정하며, 여러개

의 빔센서를 연결하면 구조물 횡단면의 내공 변위곡선을 얻을 수 있으며, EL Beam Sensor는 그림 9와 같다.

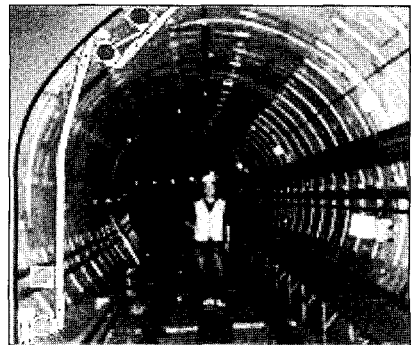
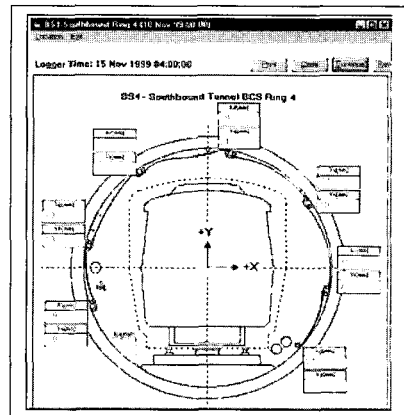


그림 10. BCS System

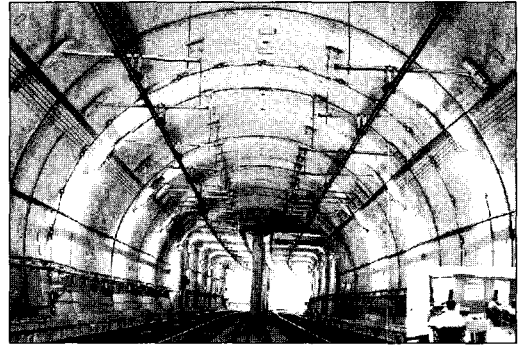
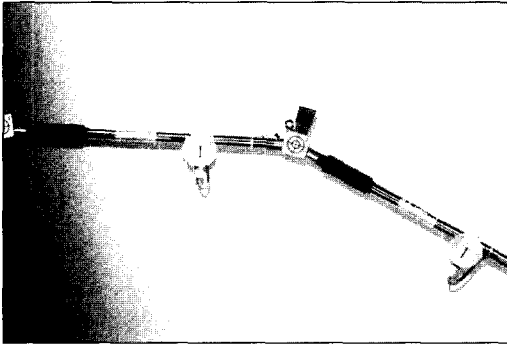


그림 11. DTL System

3.5.4 BCS(Basset Convergence System)

BCS는 터널 변형측정을 목적으로 FL Beam을 개조하여 개발하였다. 측정원리는 터널에 변형이 생기면 참고핀(Reference pin)이 움직일 때 감지하며 그 움직임은 기울기 변화량으로 저장된다. 이 시스템은 여러 개의 장축(Long arm)과 단축(Short arm)에 엠프 센서를 부착하여 길이 변화와 각도변화를 측정하여 변화된 형상을 그리므로 구조물의 거동을 전체적으로 측정할 수 있으며, Basset Convergence System은 그림 10과 같다.

3.5.5 DTL (Dongwoo Tunnel Lining system)

본 시스템은 국내에서 Basset Convergence System (BCS)을 개량한 2차원 내공변위 계측센서로 실린더의 내부에 직선성이 우수한 고정밀도의 리니어 저항을 내장하여 피스톤의 움직임을 측정하고 실린더의 몸체에 각도를 측정할 수 있는 장치를 부착하여 2차원 평면상의 한점의 위치변화를 극좌표 형태로 나타내는 센서로 그림 11과 같다. 단축과 각도센서 대신 장축에 길이 변위센서 기능을 추가하여

단축을 없앴으로 터널 라이닝면에 밀착시키므로 안정성을 확보한 제품이 개발되어 국내 지하철 유지관리계측에 많이 사용되고 있으며, 서울 지하철 5호선 한강하저터널과 왕십리 구간, 6호선과 7호선의 7개 단면에 설치 완료되어 장기계측 중에 있다. 이 기술은 2002년 11월에 건설교통부 신기술 제348호 부착식 길이와 각도 변위센서(DTL)를 이용한 터널 내공 변위 측정기술로 지정되었고, 2007년 현재 국내 현장에 많이 적용되고 있다.

3.5.6 TPMS (Tunnel Profile Monitoring System)

본 시스템은 터널의 평면형태의 단면변화를 계측하는데 사용되며, 그림 12과 같이 앵커로 부착되는 여러 개의 단면 계측기로 구성되며, 터널라이닝에 설치된다. 각각의 장비는 경사센서와 변위센서로 구성되며, 측정값들을 데이터로거를 통해 실시간으로 볼 수 있으며, GeoViewer라는 프로그램을 통해서 실시간으로 터널 단면형상을 확인할 수가 있다.

TPMS의 설치형태는 폐함된 형태(Closed Loop)와 끝단이 개방된 형태(Open Ended)로 구분되고, 캐나다의 RST에서 생산되며 2000년도에 지하철 5

도심지터널에 적용되고 있는 유지관리 계측시스템과 안전관리기준

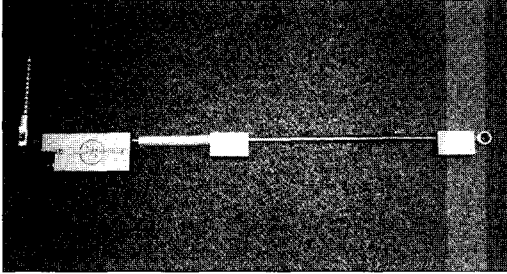


그림 12. TPMS Sensor

호선에 시험 적용한 사례가 있다.

4. 도심지터널의 유지관리계측 안전관리 기준

일반적으로 계측 관리기준 설정방법은 절대치에 의한 관리, 예측에 의한 관리, 시간 경과시 변화에 의한 관리방법 등이 있으며, 터널구조물의 기능 저하 요인으로는 완공 후 경과기간, 주변지반의 특성 및 환경, 터널 구조물의 재질, 터널을 통과하는 차종 등

에 의해 좌우된다.

이러한 다양한 원인은 터널 구조물의 국부적 불안정, 터널 라이닝의 손상, 지하수 유입 및 누수, 터널 구조물의 기능저하, 인접 구조물 손상 등을 야기하므로 이러한 주변지반 및 터널구조물의 예방적 유지관리를 위한 계측 안전관리기준의 설정은 중요하다.

계측 안전관리기준치는 지반의 거동상태, 인접구조물의 안전하게 및 지반의 역학적인 조건에 의하여 결정되므로 기준적인 수치를 명확히 제시하기 어려우며, 따라서 현장 특유의 조건을 고려하여 결정하여야 한다. 일반적으로 실내시험, 이론 및 수치해석, 그리고 초기 시공실적 및 유사한 조건을 갖는 터널의 계측결과를 토대로 결정하는 것이 합리적이다.

응력계측기인 경우 계측기 설치 시점의 하중상태를 고려한 구조해석 및 실내시험을 수행하여 초기치를 산정하고, 이를 근거로 한 관리기준치 설정이 필요하며, 각종 변위계, 균열계, 지하수위계 등의 경우에는 초기치 확인후 관리기준치를 설정하며, 초기치 설정방법을 구체적으로 제시하여야 한다.

표 2. 서울지하철 2기 1단계(5, 7, 8호선) 도심지터널 유지관리계측 안전관리기준

계 측 항 목	관 리 기 준
콘크리트 라이닝 응력	<ul style="list-style-type: none"> · 허용휨압축응력 = 67kgf/cm² $0.4f_{ck} \times 80\% = 0.4 \times 210 \times 0.8$ · 휨인장강도 = 29kgf/cm² $2.0\sqrt{f_{ck}} = 2.0 \times \sqrt{210}$
콘크리트 라이닝 철근응력	<ul style="list-style-type: none"> · 허용응력 = 1200kgf/cm² $0.5f_y \times 80\% = 0.5 \times 3,000 \times 0.8$
터널 내공변위	<ul style="list-style-type: none"> · 광섬유센서 및 전기저항식 센서 · 허용변형률 = 0.0016(0.16%) 콘크리트가 탄성 범위내에서 거동하는 최대변형률은 0.002(0.2%)이므로 0.002×80% 적용 · 3차원 광파기 측정 · 허용변위량 = ±4mm 일본 동경교통국 관리기준치는 ±5mm이므로 ±5mm×80% 적용
터널 외측도압	<ul style="list-style-type: none"> · 터널 구조계산시 이론적으로 산출한 도압을 관리 기준치로 적용
터널 외측 간극수압	<ul style="list-style-type: none"> · 터널 구조계산시 이론적으로 산출한 수압을 관리 기준치로 적용

표 3. 단계별 도심지터널 유지관리계측 안전관리기준

계측항목	안전관리 기준			비 고	
	안전	주의	정밀분석		
콘크리트 라이닝 힘 압축응력	$0.6 \times f_{ca}$	$0.8 \times f_{ca}$	$1.0 \times f_{ca}$	허용 힘 압축응력 $f_{ca} = 0.4 \times f_{ck}$	
콘크리트 라이닝 힘 인장강도	$0.6 \times f_r$	$0.8 \times f_r$	$1.0 \times f_r$	힘 인장강도(파괴계수) $f_r = 2.0 \times \sqrt{f_{ck}}$	
콘크리트 라이닝 철근응력	$0.60 \times f_{sa}$	$0.8 \times f_{sa}$	$1.0 \times f_{sa}$	허용응력 f_{sa} $f_{sa} = 0.5 \times f_y$	
터널 내공 변위	부착식 센서	$0.60 \times \epsilon_c$	$0.8 \times \epsilon_c$	$1.0 \times \epsilon_c$	탄성범위내에서 콘크리트 최대변형을 $\epsilon_c = 0.002(0.2\%)$
	3차원 광파기 측정	$0.60 \times \Delta$	$0.8 \times \Delta$	$1.0 \times \Delta$	일본 동경교통국 관리 기준치 $\Delta = \pm 5\text{mm}$
터널 외측 토압	$0.60 \times P$	$0.8 \times P$	$1.0 \times P$	터널 구조계산시 산출 토압()	
터널 외측 간극수압	$0.60 \times U$	$0.8 \times U$	$1.0 \times U$	터널 구조계산시 산출 간극수압(U)	
콘크리트 라이닝 균열	0.1이하	0.1~0.2	0.2이상	콘크리트 구조물 평가등급(B등급) 기준 - 균열 : 0.1~0.2mm	

4.1 도심지터널의 유지관리계측 안전관리 기준 설정시 고려사항

도심지터널의 유지관리계측은 이미 완공된 구조물에 대하여 공용 중에 지속적으로 구조물의 안전성 확인과 최적의 유지관리가 되도록 객관적이고 연속적인 자료를 제공하여 효율적이고, 경제적인 구조물 유지관리에 기여함을 목적으로 계측 관리기준치 설정할 경우 다음 사항을 고려해야 한다.

- ① 기존의 계측사례
- ② 설계계산 결과
- ③ 수치해석 결과

4.2 도심지터널 유지관리계측 안전관리 기준 설정방법

완공전에 설정된 관리기준치(절대치)와 현장계측치(실측치)를 비교 검토하여 그 시점에서의 안전성을 확인하는 방법으로 이 방법의 장점은 계측 결과에 대해서 즉시 대응할 수 있다는 점에서 일반적인 안전관리방법으로 사용되고 있으며, 단점으로는 설계치에 대한 관리기준의 결정방법과 현장계측치가 관리기준치를 초과했을 때의 대응방법이다.

또 하나의 절대치 관리방법은 안전율의 개념을 도입한 것으로 사전에 각 계측 항목별로 안전율을 설정하고, 설계시에 사용한 추정치 및 계측 결과치의 비와 안전율을 비교하여 안전성을 예측하는 방법이다.

절대치에 의한 관리방법은 계측결과에 신속하게 대처할 수 있어 현장에서 시공관리와 안전관리를 위해 많이 사용되고 있으며, 경험이 적은 기술자라도 안전성 판단이 어느 정도 가능하다는 장점이 있다.

4.3 도심지터널의 유지관리계측 안전관리 기준

현재 일반적으로 적용되고 있는 도심지터널의 유지관리계측 안전관리기준으로는 1995년부터 서울 지하철 2기 1단계인 5, 7, 8호선에 적용 중인 표 2가 있으며, 우종태 등이 약 10년간 장기적으로 수행된 도심지터널의 유지관리계측 실적을 종합적으로 분석하여 제시한 단계별 안전관리기준인 표 3이 있다.

참 고 문 헌

1. 우종태, 유충식(2001), 지하철 유지관리계측 세부지침 (안), 서울특별시 지하철건설본부, pp.1~66.
2. 우종태, 유충식(2000), 지하철 유지관리계측 연구보고서, 서울특별시 지하철건설본부, pp.1~153.
3. 우종태, 이 송(2002), 유지관리계측에 의한 지하철 터널의 역학적 특성, 대한토목학회논문집, Vol.22. No. 1-C, pp.89~97.
4. 우종태, 이성기(2002), 한강하저터널 단층파쇄대 구간에 대한 시공 및 운영중 계측결과와 종합분석, 대한토목학회 터널시공기술향상 대토론회 논문집, pp.123~141.
5. 우종태, 이래철(2003), 도시철도 토목구조물 변위계측 종합조사보고서, 서울특별시 도시철도공사, pp.1~250.
6. 우종태(2005), 터널 계측의 이론, 서울특별시 건설안전본부 건설현장관계자 Workshop, pp.1~89.
7. 우종태, 강경구(2006), 기존 지하철 터널의 유지관리 계측시스템 업그레이드를 위한 최신 IT 기술 적용사례, 한국구조물진단학회지 제10권 제1호, pp.43~50.
8. 우종태(2006), 유지관리계측 개론, 서울특별시 지하철 건설본부 지하철기술회보(제174호, 2006년 4월), pp.55~87.
9. 우종태(2006), 터널계측의 이론과 실무, 구미서관, pp.363~394.
10. 한국터널공학회(2004), 터널의 이론과 실무, pp. 309~346.
11. 한국지반공학회(2001), 정보화 시공, 지반공학시리즈 12, 구미서관.

골프동호회 행사 알림

한국지반공학회 '07 가을학술발표회 사전행사 일환으로 아래와 같이 운동모임을 공지하오니 회원여러분의 많은 참석 바랍니다.

- ▶ 일 시 : 2007년 9월 13일(목)
- ▶ 장 소 : 동래 베네스트 GC (부산소재)
- ▶ 참가방법 : 학회 회원, 선착순(7팀, 28명) 학회 사무국으로 등록바람.
- ▶ 참가비 : 그린피 + 캐디피 (각자부담)
- ▶ 시 상 : 우승, 메달리스트, 준우승, 3위, 롱기스트, 니어리스트, 기타
- ▶ 연락처 : 학회 사무국 Tel : 02)3474-4428 Fax : 02)3474-7379 E-mail : kgssmf@chol.com