

# 지하철 유지관리 계획의 문제점 분석 및 개선방안 연구

## Case Study on Analysis the Problem and Improvement of Subway Maintenance Monitoring

우종태<sup>1)</sup>, Jong-Tae Woo\*, 김홍석<sup>2)</sup>, Hong-Seok Kim

<sup>1)</sup> 경북대학 토목설계과 교수, Professor, Dep't of Civil Eng. Design, Kyung-Bok College

<sup>2)</sup> 서울특별시 지하철건설본부 토목공사팀장, Civil Dep't, Office of Subway Construction, S.M.G.

**SYNOPSIS** : By means of analyzing the problems in monitoring plan, design, installation, operation based on maintenance monitoring system installed in subway tunnel section, the methods of improvement were proposed for applying to subway monitoring maintenance effectively in future. The choice of the better monitoring system, the operating method of monitoring system, the confidence and continuity of maintenance monitoring, the performance of responsible monitoring supervision in the phase of the planning of monitoring and design were proposed. The problem and developed plan in the different monitoring systems, the calibration and correction of monitoring system, the analysis for the results and plan for maintenance in the phase of installation of monitoring system and operation were also proposed.

**Key words** : Subway maintenance monitoring, monitoring plan, design, installation, operation

### 1. 서론

최근 들어 사회기반시설 확충에 따라 지하철, 도로, 일반 및 고속철도, 전력구, 통신구, 공동구 등 국내 터널구조물들의 건설이 급격히 증가되고 있는 반면 이에 대한 체계적인 유지관리 및 보수·보강에 대한 대책이 미흡한 실정이다. 특히, 토목구조물과 관련된 사고가 다발하고 최근 들어 잇달아 발생하는 지하 토목구조물의 안전에 관한 문제는 사회문제로 대두되고 있으며, 이에 따라 지하철 구조물의 유지관리에 관한 필요성이 부각되고 있다.

지하철 구조물은 많은 시민이 정기적으로 이용하며 시공 후 차량운행 중에도 구조적 안전성 확보 및 유지관리에 세심한 배려가 요구된다.

토목 구조물의 유지관리는 일반적으로 안전점검 및 안전진단을 통해 이루어져 왔으나, 최근 들어 안전점검 및 안전진단 이외에도 실시간 계측을 통해 구조물의 장기적인 거동을 파악하고 이를 유지관리하기 위한 자료로 사용하는 유지관리 계획이 일반화되어 가고 있으며, 특히 지하철 구간에서는 앞으로 유지관리 계획을 이용한 구조물의 관리가 중요한 부분을 차지할 전망이다.

서울지하철 유지관리 계획의 도입 배경은 성수대교 사고, 삼풍백화점 붕괴사고 이후 구조물의 예방적 안전관리를 위해 국내 최초로 한강을 통과하여 건설된 5호선 한강 하저터널의 안전성 확보차원에서 검토가 시작되었다.

그러나 계측 신기술을 도입하기 위해서는 충분한 사전조사와 연구, 그리고 시험시공 등의 절차와 검증을 거쳐 도입이 되어야 하나, 그 당시 여건은 충분한 사전준비 과정이 생략된 채 단기간 내에 결과만을 요구하는 사회적 분위기로 일부 외국사례와 전문가의 자문회의를 거쳐 계획이 수립될 수밖에 없는 실정이었으며, 기술자들 사이에도 수 십년간 육안 관찰에 의지하여 구조물 유지관리가 안전하게 되고 있다며 유지관리 계획 자체를 부정하는 기술자도 많은 형편이었다.

또한 국내 계측업체도 기술력과 자본금이 미약하고 터널 유지관리 계측 실적이 전무한 상태에서 계측 신기술 도입은 시기상조처럼 보였으나, 기술선진국 기술적인 도움과 사용실적이 일부 검증된 계측기종을 확인한 후 국내 지하철 구조물에 유지관리 계측이 도입될 수 있었다. (우종태, 1997)

따라서 본 고에서는 지하철 2기1단계 구간(5,7,8호선)에 설치 운영중인 유지관리 계측 시스템을 토대로 계측 계획 및 설계 단계와 설치 및 운영 단계의 문제점을 분석하여 향후 지하철 유지관리 계측에 효율적으로 적용하기 위한 개선방안을 제안하고자 한다.

## 2. 유지관리 계측의 목적

계측이란 인간의 능력과 계측기기의 성능을 조합해서 공학적인 정보를 정확하게 수집하여 분석하는 행위로 이론과 기법, 통찰과 경험, 측정기술과 기기를 조합해서 공학적인 문제해결에 필요한 정량적, 정성적인 정보를 얻는 행위이며, 계측기를 통하여 측정된 자료를 검토 분석하여 정량적인 판단기준을 제시하며, 계측결과와 분석을 통하여 구조물의 특성과의 연관성을 파악하고, 구조물의 현 상태 및 발생 가능한 문제를 관측 및 예측하는 행위를 의미한다. (장승필, 1998)

터널에서의 유지관리 계측은 터널 구조물 완공 후 사용기간 중에 굴착면 주변지반의 변화와 영향으로 인하여 발생하는 배면지반, 토압 및 수압의 변화와 콘크리트 구조물의 변화 양상, 환경조건 등을 측정하여 터널 구조물의 안전성을 확인하는데 있다. (대한터널학회, 1999)

일반적으로 터널 구조물은 많은 가정사항을 포함하고 있는 이론적 해석방법과 불안전 요소를 갖는 경험적, 반 경험적 방법 등을 통해 설계가 이루어지고 있고, 시공의 정밀성이 구조물의 안정에 중요한 영향을 미친다는 점등으로 인해 구조물의 재료 및 구조적 특성이나 현장 여건의 공학적 특성에 따라 시공 시 많은 문제가 야기될 수 있다. 또한 재료의 비등방성과 시공방식에 의해 완공된 구조물은 설계상태와 완전히 일치하지 않는 경우가 대부분으로 공용상태에서 구조물의 열화상태 파악이 곤란하게 된다.

따라서 터널에서의 계측은 크게 시공중 계측과 유지관리 계측으로 구분된다. 시공중 계측은 주로 설계의 불확정성 요소 등을 보완하고 설계의 타당성을 규명하므로써 시공의 안전성과 경제성을 제공하는 반면 유지관리 계측은 이미 완공된 구조물에 대하여 공용 중에 지속적으로 구조물의 안전성 확인과 최적의 유지관리가 되도록 객관적이고 연속적인 자료를 제공하여 효율적이고 경제적인 구조물 유지관리에 기여하는데 있다.

지하철 구조물은 대개 환경변화가 적은 지하에 건설되어 구조적으로 타 구조물에 비해 비교적 안전한 것으로 알려져 있어 그 동안 다른 토목 구조물에 비해 유지관리에 대한 인식이 적었으나, 지하철 건설 구간 중 지반 취약지점, 하천 횡단지점, 기존 지하철(도시철도, 국철)통과지점, 고가도로 및 교량 교각 직하부 통과지점, 도시개발 및 재개발 등으로 근접시공이 예상되는 지점 등과 같은 취약구간은 지하철 운행시 열차진동 및 풍압의 영향 외에 과대한 지하수위 변화, 외부하중의 변화, 근접굴착에 따른 배면지반의 이완 등으로 지하철 구조물에 변위 발생과 응력 변동 등의 장기적 구조물 거동발생 가능성이 있어 지하철 구조물에 대한 유지관리 계측의 중요성이 대두되고 있다.

따라서 유지관리 계측 시스템은 지하철 공용기간 동안의 안전성을 확보하고 향후 건설되는 지하철의 설계 및 해석기술 개발에 필요한 자료를 제공하며, 구조물의 예방 유지관리를 가능하게 함으로써 이에 필요한 인력 및 전체적인 유지관리 비용 절감효과를 기대할 수 있다.

계측에 의한 유지관리 시스템의 기본 개념은 구조물이 존재하는 한 계측이 지속적으로 이루어지는 것이나, 구조물 전체에 대해 유지관리 계측이 수행되는 것은 현실적으로 무리가 있어 주변여건이나 환경이 가장 불리한 구조물의 상태를 대표적으로 나타낼 수 있는 지점에 국한하여 유지관리 계측을 수행하게 된다. 설계와 구조해석에 의한 결과에 근거하여 시공중 계측 및 유지관리 계측이 수행되며 이 측정치는 미리 설정되거나 수년간의 분석을 통해 마련된 관리 기준치와 비교하여 지속적으로 구조물의 공용성을 판단하게 된다.

따라서 효율적이고 정확한 구조물의 상태파악을 위해서는 상시 계측을 기본으로 한 유지관리 계측 시스템 구축이 필요하다.

### 3. 지하철 유지관리 계측의 문제점 및 개선방안

#### 3.1 계측 계획 및 설계 단계

##### 3.1.1 문제점

지하철 유지관리 계측 계획 및 설계 단계에서의 문제점은 최초 계획 당시에도 문제점으로 언급한 바 있으며 구체적인 내용은 다음과 같다. (우종태, 1997)

1) 우수한 계측기종의 선정.

단기간 내에 계측기기 성능확인이 곤란하며, 계측기기의 성능이 우수하더라도 계측기기 설치기술자의 숙련도에 따른 계측기기의 손상실 발생이 예상되며, 이로 인해 계측 결과치의 신뢰도 저하가 우려됨.

2) 계측기기의 내구년한 검증 및 무상보증기간 설정.

3) 계측 시스템의 운영방법.

초기 투자비에 우선한 수동계측 위주의 계측 시스템 채택

4) 유지관리 계측의 신뢰성과 연속성 유지 곤란.

계측위치 선정부터 계측결과 분석 및 계측기기의 유지관리에 이르는 전과정을 장기간 동일 계측업체에서 일관성 있는 계약 이행이 요구되나, 지하철건설기관(서울특별시 지하철건설본부)과 운영 및 유지관리기관(서울특별시 도시철도공사)이 구분되어 있어 계측기기 설치시의 발주처와 유지관리시의 발주처가 분리되고, 관련 법규상 장기계속계약 시행이 곤란함에 따라 1년 단위로 새로운 계측업체를 공개경쟁 입찰로 선정하여 최초 계측기 설치업체, 1차 계측 측정 분석 및 유지관리업체, 2차 계측 측정 분석 및 유지관리업체가 서로 다르므로 인해 많은 문제점이 발생하였다.

##### 3.1.2 개선방안

유지관리 계측 계획 및 설계 단계에서의 개선방안은 다음과 같다.

1) 우수한 계측기종의 선정

계측기종 선정은 계측기의 현장 적용성, 정확성, 정밀도, 내구년한 등을 종합적으로 고려해야 하며, 특히 매립식 계측기기인 경우는 반영구적인 내구년한이 보장되어야 하므로 유사 현장조건에 기 적용한 실적이 있는 계측기종을 선정하는 것이 바람직하며, 계측기기의 성능은 현재 국내에서도 여러 계측전문업체에서 다양한 계측기종을 생산하여 현장에 적용하고 있으나, 국내 계측기기의 조립과정이나 생산기반 등을 볼 때 생산업체별로 기술 수준차이로 계측기기의 신뢰도 차이가 크며, 특히 시스템으로 구성되어 설치되는 계측기기인 경우는 신뢰도 차이가 더욱 큰 실정이다.

이에 비해 계측기술이 발달된 기술선진국의 경우는 계측업체별로 전세계 현장을 대상으로 각종 시험과정을 거쳐 대량 생산하여 계측 신뢰도가 높으며, 내구성이 검증된 계측기기가 있으나, 가격면에서 국산에 비해 월등히 높고, 고장 및 문제 발생 시 신속한 대응이 곤란하여 계측시기가 상실되는 문제점이 있다.

따라서 계측기기의 성능은 일정기간 시험시공을 통한 검증절차가 필요하며(A.I Feldman, 1999) 계측기기의 자체성능이 아무리 우수하더라도 현장 설치과정 및 후속 공정관리가 미흡하다면 소기의 목적 달성은 어려울 것이다. 또한 현재의 계측항목은 주로 콘크리트 라이닝의 변형여부 위주의 계측이므로 앞으로는 원지반의 외압변화를 동시에 측정하여 터널 내부 또는 외부의 환경조건과 하중 조건의 변화에 따른 응력 분배의 변화와 지보 기능 측정 등의 계측항목이 필요하다.

2) 계측기기의 내구년한

최근 지하철 구조물 내구성 확보를 위한 설계·시공 및 유지관리지침안(서울특별시 지하철건설본부, 1999)에 따르면 지하철 구조물의 목표 내구년한은 100년으로 설정되어 유지관리 계측 시스템도

구조물의 수명년수에 버금가도록 할 필요성이 있으며, 현재까지의 관련분야 확인 결과 매립식의 경우는 반영구적으로 최소 30년 이상, 부착식 및 노출형인 경우 최소 10년 이상 내구년한이 보증되어야 할 것으로 판단된다. (한국도로공사, 1997)

계측기기의 내구년한은 내구년한 동안의 정상작동률(생존률-손망실률)로 표현이 되며, 이는 계측기기의 성능과 내구성, 설치기술자의 기술정도, 후속공정(철근배근, 거푸집설치, 콘크리트타설, 거푸집 제거 등)의 철저한 관리여부, 유지관리 기술수준과 투자비에 따라 큰 차이를 보이므로(신동훈 등, 1999) 업체 선정시 저가의 계측공사비 보다는 계측 기술수준이 높은 업체가 참여될 수 있도록 유도해야 하며, 매립식 계측기인 경우는 여유율(손망실률)을 전혀 고려하지 않고 설치하였으나(Colin S.Harris: 1996, 배규진 등: 1998, 과학기술: 1999) 향후에는 잠정적으로 약 10~15% 범위 내에서 계측기를 추가 설치하여 계측기 고장으로 인해 유효한 계측데이터 획득에 문제가 없도록 해야 한다.

### 3) 무상보증기간

계측기기에 대한 무상보증기간은 전기 및 전자제품의 규정과 같이 1년을 유효기간으로 하고 있으나, 전기전자 기술수준의 향상으로 무상보증기간도 장기화되는 추세에 있다.

당초 계측기기에 대한 무상보증기간은 지하철 하저터널의 경우 토목구조물에 준해 하자담보 책임기간을 5년으로 적용하였으나, 유지관리기간 중 계측기기의 손망실에 대해 계측기기 설치업체와 토목구조물 시공업체 및 유지관리 계측 측정업체간의 의견차이로 분쟁이 지속되었고, 특히 외부 충격 등으로 인한 손망실인 경우 책임한계가 불분명한 경우도 있었다.

따라서 계측업체 선정시 무상보증기간을 평가항목에 반영하고, 장기적으로 무상보증기간을 제시하는 업체에 가산점을 추가하여 책임시공 및 보증이 되도록 유도하고, 현재까지의 관련분야 확인 결과 계측 시스템의 무상보증기간은 최종설치 준공일로부터 최소 3년으로 해야 할 것으로 판단된다. (한국고속철도건설공단, 1999)

### 4) 계측 시스템의 운영방법

계측 시스템은 운영방식에 따라 수동, 반자동, 자동 계측시스템으로 구분되며, 이의 구분은 유지관리 측면에서의 경제성, 효율성, 신뢰성 및 계측 데이터의 용량과 처리속도 등을 종합적으로 고려하여 결정되어야 한다.

수동 계측시스템인 경우는 계측치 획득에 많은 시간과 인력이 소요되고 구조물 상대평가에 따른 적기의 안전조치 시행시기의 상실우려가 있어 계측항목이 많고 계측기기가 집중적으로 설치되어 있는 구간은 자동 계측시스템으로 계획하는 것이 바람직하며(한국전산구조공학회, 1996) 향후 계측분석 시스템과 상대평가 시스템의 개발이 실제 현장에 적용될 경우는 자동 계측시스템이 더욱 확대 시행될 것으로 전망된다. (B.Leger, J.C.Roussel, 1997)

### 5) 유지관리 계측의 신뢰성과 연속성 유지

계측관리 상의 유지관리 계측의 신뢰성과 연속성을 유지하고 계측기술의 발전을 도모하기 위해서 최초 계측기기 설치업체에서 무상보증기간 까지 계측 측정, 계측결과 개략 분석 및 유지관리가 되도록 하는 합리적인 시행이 필요하다.

### 6) 계측 책임감리 시행

유지관리 계측은 각 전문분야(토목, 전기, 신호통신, 정보처리 등)의 종합 기술력이 필요하며, 장기간에 걸쳐 계측의 정밀도, 정확도, 내구성이 요구되는 분야이므로 계측기술력이 계측업체 선정시에 가장 우선 순위가 되어야 한다.

따라서 입찰자격 사전심사제도(PQ)로 계측업체를 선정할 경우에는 계측에 참여할 적격업체를 선정하기 위한 사업수행 능력평가서 작성지침과 평가기준을 수립하여야 하고, 계측기기의 공개적인 검증이 필요한 경우에는 시험운영 계획서 작성지침과 평가기준을 작성하고, 시험운영기간 중 평가기준에 의해 검증된 계측기기가 현장에 도입 설치되도록 해야한다. 그러므로 계측계획 초기부터 계측 전문가 또는 계측 책임감리를 투입하여 계측계획 적정여부 검토, 계측기기와 계측 시스템의 검수 및 설치 확인, 계측 운영체제와 운영프로그램의 검수 및 정상 작동상태의 확인, 초기치 측정 시기 및 적정여부 판단 등 각 계측 시공단계별로 계측 책임감리를 시행하여 계측 설치기술과 계측 관리기술이 향상 되도록 계측 책임감리 시행이 필요하다.

## 3.2 계측기기의 설치 및 운영 단계

### 3.2.1 계측기기별 문제점 및 대책

#### 1) 매립식 계측센서

토압계, 간극수압계, 철근응력계, 콘크리트응력계 등의 매립식 계측센서의 문제점 및 대책은 다음과 같다. (서울특별시 도시철도공사, 신풍컨설턴트, 1999)

##### (1) 문제점

- 센서 제작시 만들어지는 검정표(Calibration chart) 미비로 계산식에 적용되는 상수값이나 초기값 파악이 어려움.
- 센서설치 당시의 영점이 계측업체에서 출하당시의 표준값(Certificated value)과 일치하지 않거나, 현장검정(Field calibration) 및 보정 미비로 인한 신뢰도 문제.
- 초기치 측정시기가 적정한지의 여부.
- 계측기기의 노이즈(Noise) 제거를 위한 접지방법.
- 침수에 대비한 완전 방수형 계측기기의 선택.
- 터널내에 공급되는 전압이 일정하지 않음.
- 콘크리트의 건조수축 및 온도에 의한 변형률 측정 미고려.
- 콘크리트 재료의 물성시험 미실시로 정확한 응력값 환산 곤란.

##### (2) 대책

- 센서 제작사의 검정표 입수하여 사전 상수값 및 초기값 파악.
- 정확도, 정밀도, 내구성위주의 검정과 교정실시 및 전문계측기술자에 의한 계측기설치 의무화
- 최초 설치 후 수 차례 반복 측정으로 정확한 초기치 결정.
  - 초기치 계측 측정시기는 외부 하중이 작용하기 전, 후에 측정.
- 계측기기별 접지(Earth end) 또는 차폐(Shielding, Cabling) 실시.
- 계측기기의 시험항목 결정.
  - 일정수준의 침수와 습기, 터널내 물청소, 열차진동, 가벼운 충격 등에 문제가 없을 정도의 내구성 확보.
- 일정한 전압유지를 위해 정전압 유지장치 설치.
- 콘크리트의 건조수축과 온도변화에 의한 변형률 측정.
  - 무응력계를 설치하여 콘크리트의 건조수축과 온도변화에 의한 변형률을 측정하고, 변형률계의 계측부분 중 순수하게 외력에 의한 변형률과 구분.
- 콘크리트 재료의 물성시험을 실시하여 정확한 응력값 획득.

#### 2) 부착식 계측센서

광섬유 센서 및 전기저항식 변위센서의 문제점 및 대책은 다음과 같다. (서울특별시 철도공사, 신풍컨설턴트, 1999)

##### (1) 문제점

##### ① 광섬유 센서

- 외국 제작사로부터 기술 이전 받기가 매우 어렵고, 운영 프로그램 구입비가 고가이며, 계측자료 처리 시마다 별도 비용 요구 및 센서에 이상 발생 시 문제 해결에 장기간 소요.
- 터널 내공 전단면에 부착된 광섬유 센서는 길이에 대한 변형량을 측정함으로 해당 길이에 대한 실변위 산정 곤란.

##### ② 전기저항식 변위센서

- 습기에 취약하여 부식 발생으로 손망실률이 큼.

(2) 대책

① 광섬유 센서

- 외국제품을 도입하여 사용하는 경우 가능한 한 기술 이전과 함께 운영 프로그램의 통신규약을 공개 받아 호환성 있는 통합 운영 프로그램에 포함시켜 운영.
- 광섬유센서의 정밀도와 신뢰성에 대체할 수 있는 저가의 전단면 내공 변위계 개발.

② 전기저항식 변위센서

- 완벽한 방수처리, 습기에 강한 센서 사용.
- 표면부착식 계측센서 및 자동화 계측시스템은 제품 생산시 습기에 대해 완전해야 하며, 침수에 대한 고려 필요.
- 터널내 습기제거를 위해 항온 및 항습 장비 설치.

3) 3차원 광파측정기

(1) 문제점

① 광파기

- 교정 없이 장기간 사용시 기계적 오차 발생.
- 터널 내 온도, 습도, 기압 등에 따라 측정오차 발생.
- 유지관리 계측업체의 빈번한 변경으로 측정자가 서로 달라 큰 개인오차 발생.

② 기준점

- 터널벽면에 낮게 설치되어 터널 출입자에 의한 파손 및 위치 변동되어 이로 인한 오차 발생.
- 기준점 표면에 장기간 먼지가 묻어있어 측정 정도가 떨어짐.

③ 변위 측정점

- 전동차 운행 시 진동, 풍압 영향으로 위치 변동되어 측정 시 오차발생.

(2) 대책

① 광파기

- 기계적 오차를 줄이기 위해 최소 년1회 이상 교정 실시.
- 터널 내 온도와 기압 등에 따라 측정치에 온도계와 기압계로 보정 실시.
- 동일한 측정자가 지속적으로 반복 측정토록 하여 개인오차 제거.

② 기준점

- 터널 출입자가 쉽게 접근 및 접촉하지 못하도록 보호함 설치.
- 기준점 표면에 묻어 있는 먼지 제거 시 기준점이 변동되지 않도록 유의.
- 기준점 설치 위치는 터널 단면 외측에 설치하는 것이 유리.

③ 변위 측정점

- 전동차 운행시의 진동 및 풍압에 고정점이 움직이지 않도록 견고하게 고정.
- 변위 측정점을 현재 단면당 3개를 5개정도로 설치하여 정밀도 증대.

3차원 광파측정에 의한 변위측정은 타켓(기준점, 변위 측정점) 유지관리(전동차 풍속으로 인한 타켓 움직임 및 파손, 먼지로 인한 시준오차 발생)가 어렵고, 계측 측정시마다 오차가 발생되어 실제 변위인지 확인을 위한 추가적인 정밀 육안관찰이 요구되며, 전차선 전원이 단전되는 심야시간에 계측 측정반(최소 3인)이 투입되므로 작업능률 저하 및 측정 인건비 과다 소요로 계측 신뢰도 및 경제성이 낮아 향후에는 3차원 변위 측정 수량을 최소화하되 매립식 또는 부착식 계측기기가 설치되는 대표관리단면 계측의 검증을 위한 보조적인 수단으로 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4) 계측 시스템

① 문제점

- 자동화 계측 시스템이 지하철 5호선 마포와 강동으로 이원화되어 있어 계측관리의 효율성이 저하됨.
- 운영 프로그램이 MS-DOS 운영체제이며, 계측치 변화에 대한 그래픽기능 등의 계측관리자 편의 위주의 기능이 적음.

- 계측기기를 장거리 케이블(약 1~2km)로 연결하여 통신하므로 노이즈 영향이 있음.

② 대책

- 기존의 지하철 5호선 계측시스템을 향후 설치 예정인 2기2단계 유지관리 계측시스템에 포함하여 서울지하철 통합 유지관리 계측 운영체제로 관리.
  - 영등포 교차로 교각하부 통과구간 - 수동계측
    - 대표관리단면 계측 : 1단면 (복선터널)
      - 계측항목 : 토압계, 간극수압계, 철근 및 콘크리트 응력계
  - 한강 하저터널 구간 (여의나루역~마포역) - 자동계측
    - 대표관리단면 계측 : 3단면 (단선터널)
      - 계측항목 : 토압계, 간극수압계, 철근 및 콘크리트 응력계, 광섬유 센서
    - 일상관리단면 계측 : 23단면 (단선터널)- 전기저항식 변위센서
  - 한강 통과구간(광나루역~강동역) - 자동계측
    - 일상관리단면 계측 : 4단면 (복선터널)
      - 계측항목 : 광섬유 센서
- 통합 운영 프로그램은 윈도우 환경에서 대상 구조물의 전경을 배경으로 센서 부착단면을 그래픽 화면에서 직접 선택하고, 계측치의 변화량을 즉시 판단하며, 각 계측이력은 실시간과 데이터베이스의 기록을 통계 처리하여 다양한 비교 분석이 되도록 통합 운영 프로그램 개발.
- 계측기기의 통신방법은 다양하므로 고전압 및 유도장애, 누설전류, 온도나 습도 주위환경에 관계없이 정상작동 되도록 하며, 유지관리비를 고려하여 결정.

따라서 지하철 5호선 수동계측 구간과 자동계측 구간을 2기2단계 유지관리 계측용역에 포함하여 낮은 기술수준의 계측 시스템을 업그레이드 시켜 통합 운영 계측 시스템에 포함하여 유지관리 계측의 효율성 증대와 일관성 있는 계측관리 및 계측치의 신뢰성 증진이 필요하다.

5) 지속적인 계측을 위한 센서의 문제점

① 침수로 인해 지속적인 계측불가

공사중 하저터널 침수로 인해 시공중 수동계측 과정에서 일부의 계측센서 케이블 이음부 및 외부 측정 케이블 부위로 침수 압력수가 침투되어 케이블내의 자극부와 측정부가 서로 합선되거나 과다 잡음발생 또는 자극 및 입력조건의 변화로 실질적인 계측 데이터 획득이 불가능하였으며, 일부 계측센서는 침수 후 계측이 되지 않다가 어느 정도 기간이 경과 후 재 계측되고 있으며 이는 케이블 내부에 있는 침투수가 건조되어 재 계측이 되고 있는 것으로 판단된다.

② 측정값의 불안정

자동계측기에서 값을 측정할 수 는 있으나 계측값 자체가 일정의 증폭을 보이다가 일관성 있는 움직임 추세를 보이는 경우와 증가 또는 감소하지 않고 변칙성 움직임을 보이다가 진폭이 센서의 사용범위를 벗어난 수치를 나타낼 경우이다.

이런 경우는 계측 측정케이블 중 자극부 또는 측정부중 어느 한 선이 단락 되거나 센서 자체의 사용범위를 넘어선 경우 또는 센서 및 케이블 주변의 과전압이나 전류가 작용하여 동일 조건의 자극과 측정이 원활하게 이루어지지 않을 경우에 발생할 수 있다.

③ 측정범위를 벗어남

이 경우는 측정값 불안정과 거의 유사한 형태를 나타내나 자동계측기에서 값 자체를 읽어내지 못하고 에러 메세지(Error message)를 나타내는 경우로 측정값을 자동계측기로 읽을 수 없는 수치이거나 측정값이 영(Zero)인 경우를 의미한다.

이런 경우는 계측값이 자동계측기 측정범위를 넘어선 경우이거나 계측 측정케이블의 자극부와 측정부 두선 모두 단락 되었을 경우에 발생할 수 있다.

④ 자동 계측시스템 구축전의 연결선 단선

자동 계측시스템 구축전 수동 계측을 통한 센서의 이상여부 확인시에 계측값이 변칙적인 움직임을 보이며 진폭이 센서의 사용범위를 벗어난 수치를 나타내었을 경우이다. 이런 경우는 자동 계측시스템 구축전에 이미 계측 측정 케이블 중 자극부 또는 측정부의 어느 한선이 단락 되거나 혹은

두선 모두 단락 되었을 경우에 발생할 수 있다

⑤ 개인오차

기술자의 실수로 인해 발생할 수 있는 경우 자동 계측시스템 구축시 센서의 자극부와 측정부를 자동 계측기와 연결하지 않았을 경우 또는 자동 계측시스템 구축후 자동계측기 내 해당 센서에 대한 명령 입력을 하지 않았을 경우에 발생할 수 있다.

### 3.2.2 계측기기의 검정과 교정

계측기기는 정확한 측정을 위해 사용 전에 검정을 받고 사용 중에는 기계오차에 대하여 주기적인 교정이 필수적이나, 대부분의 국내 계측기기는 계량 및 측정에 관한 법률 시행규칙 (검정의 생략 등) 내용 중 새로이 개발된 계량기로서 그에 대한 검정 설비가 구비되어 있지 않은 계량기이거나, 검정에 특수한 설비를 필요로 하는 계량기에 해당되어 검교정 대상도 아니며, 국가표준 및 검인증 기준이 없어 국가공인기관에서의 검교정이 어려운 실정이며, 이로 인해 계측업체에서 자체적인 기준에 의해 검교정을 실시하고 있다. (남순성, 신평컨설턴트, 1999)

국내에 등록되어 있는 교정검사기관에서 교정검사를 할 수 있다는 항목을 표 1에서 보면, 계측기기에 대한 1/1000mm 길이변형을 측정할 수 있는 기관은 서울의 생산기술연구원과 대전의 한국표준과학연구원 뿐이며, 온도교정의 경우는 한국표준과학연구원 외에는 교정검사가 시행되고 있지 않으며, 각 지역별로 있는 중소기업청(사무소)의 경우는 길이변형을 측정할 수 있으나, 1/1000mm 교정검사 장비는 미보유 상태이며, 대기업 부설연구소의 경우는 자사 협력업체만 교정검사를 해주고 있는 실정이다.

따라서 국산 계측기기인 경우 공업진흥청에서 검교정 항목과 시험방법을 제정하고, 전국에 등록되어 있는 교정검사기관의 계측기기 검교정 설비를 확충하여 검교정을 할 수 있도록 하는 방안 또는 계측전문업체로 구성되는 가칭 건설계측협회를 설립하여 주기적인 검교정이 되도록 하는 방안이 있으며, 외산 계측기기인 경우 자국 또는 국제적으로 인증받은 기관의 검정 증명서를 계측기기 납품시 제출 받는 방법 또는 검교정 방법에 의해 국내 공인기관에 의뢰하여 검교정하는 방법 등이 있다.



표 1. 국내 교정검사기관 현황

(단위 : 개사)

지역별	교정검사기관수	길이변형(1/1000mm) 교정검사 가능여부			
		계	가능	불가능	불가사유
계	118	118	13	105	
서울지역	26 (생산기술연구원외)	26	1 (생산기술 연구소)	25 · 길이변형측정 시행 : 2 · 길이변형측정 미시행 : 2	· 길이 변형측정을 하지 않거나 · 1/1000mm 교정검사장비 미보유
부산지역	6 (부산지방 중소기업청외)	6	-	6 · 길이변형측정 시행 : 4 · 길이변형측정 미시행 : 2	“
대구지역	3 (대구경북지방 중소기업청외)	3	1 (대우기전 공업)	2 · 길이변형측정 시행 : 1 · 길이변형측정 미시행 : 1	“
광주지역	5 (광주전남지방 중소기업청외)	5	-	5 · 길이변형측정 시행 : 4 · 길이변형측정 미시행 : 1	“
인천지역	7 (인천지방중소기업 청외)	7	-	7 · 길이변형측정 시행 : 3 · 길이변형측정 미시행 : 4	“
대전지역	5 (한국표준과학연구 원외)	5	1 (한국표준 과학연구원)	4 · 길이변형측정 시행 : 1 · 길이변형측정 미시행 : 1	“
강원지역	1 (강원지방중소기업 사무소)	1	-	1 · 길이변형측정 미시행 : 1	“
경기지역	32 (삼성전자외)	32	3 (삼성전자, 한국 일축, 국립기술 품질원)	29 · 길이변형측정 시행 : 8 · 길이변형측정 미시행 : 21	“
경남지역	20 (대우중공업외)	20	2 (두원중공업, 대우중공업)	18 · 길이변형측정 시행 : 17 · 길이변형측정 미시행 : 1	“
경북지역	8 (LG정밀외)	8	5 (LG정밀, 포항종합제철, 삼성전자, 오리온전기, LG전자)	3 · 길이변형측정 시행 : 3	· 1/1000mm교정 검사장비 미보유
전남지역	2 (LG화학외)	2	-	2 · 길이변형측정 시행 : 1 · 길이변형측정 미시행 : 1	· 길이변형 측정을 하지 않거나, · 1/1000mm교정 검사장비 미보유
전북지역	2 (전북지방중소기업 사무소)	2	-	2 · 길이변형측정 시행 : 1 · 길이변형측정 미시행 : 1	“
제주지역	1 (제주지방중소기업 사무소)	1	-	1 · 길이변형측정 미시행 : 1	· 1/1000mm교정 검사장비 미보유

3.2.3 계측결과 분석 및 계측기기의 유지관리

유지관리 계측의 신뢰성과 연속성을 확보하기 위해 계측기 설치업체에서 일정기간 계측 측정, 분석 및 유지관리가 요구되나, 지하철건설기관(서울특별시 지하철건설본부)과 운영 및 유지관리기관(서울특별시 도시철도공사)이 구분되어 있어 계측기 설치시 발주처와 유지관리시의 발주처가 분리되고, 계약법규상 장기계속 계약이 되지 않아 1년 단위로 새로운 유지관리 계측업체를 공개경쟁입찰로 선정하므로 이로 인해 발생하는 문제점은 다음과 같다. (서울특별시 도시철도공사, 1998, 1999)

1) 문제점

- ① 매년 유지관리 계측업체가 변경됨.
- ② 계측업체의 난립으로 과도한 경쟁, 무분별한 저가수주로 계측 수준 저하.
- ③ 3차원 광파 측정의 경우 설치업체와 측정업체가 달라 측정 정밀도 저하.
  - 측정기기의 기종 변경에 대한 정밀도 차이.
  - 측각자 수시 변경으로 큰 개인오차 발생.
- ④ 계측 분석의 일관성 유지 곤란.
- ⑤ 계측기기의 손상실에 대해 설치업체와 다수의 측정 업체간에 의견 상충.

2) 대책

- ① 계측기기 설치업체가 무상보증기간 동안 계측 측정, 분석 및 유지관리가 되도록 장기 계속 계약 시행.
- ② 자동 계측시스템을 확대 적용하고, 3차원 광파 측정은 측정 인건비 과다소요 및 계측 신뢰도가 저하되어 향후에는 3차원 변위 측정 수량을 최소화하되 매립식 또는 부착식 계측기기가 설치 되는 대표관리단면 계측의 검증을 위한 보조수단으로 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단됨.

#### 4. 결 론

본 고에서는 서울지하철 2기1단계 구간에 설치 운영중인 유지관리 계측 시스템을 토대로 계측 계획 및 설계 단계와 설치 및 운영 단계의 문제점을 분석하고 이에 대한 개선방안을 제시하였으며, 결론은 다음과 같다.

1) 계측기종 선정은 계측기기의 현장 적용성, 정확성, 정밀도, 내구년한 등을 종합적으로 고려해야 하며, 특히 매립식 계측기기인 경우는 반영구적인 내구년한이 보장되어야 하므로 유사 현장조건에 기 적용한 계측기종을 선정하거나, 계측기기의 성능을 일정기간 시험시공을 통해 검증된 우수한 계측기종을 선정하는 것이 바람직하다.

2) 지하철 구조물의 목표 내구년한은 100년으로 설정되어 매립식 계측기는 내구년한이 반영구적으로 최소 30년 이상, 부착식 및 노출형인 경우는 최소한 10년간 내구년한이 보증되어야 할 것으로 보이며, 계측기기의 무상보증기간은 최종 설치 준공일로부터 최소 3년으로 적용하는 추세이므로 계측기술력이 계측업체 선정시 가장 우선 순위가 되어야 할 것이다.

3) 계측시스템의 운영은 계측항목이 많고 계측기기가 집중적으로 설치되어 있는 구간은 향후 계측 분석 시스템과 상태 평가 시스템이 실제 현장에 적용될 경우에 대비하여 자동 계측시스템이 바람직하다.

4) 계측의 신뢰성과 연속성을 유지하고 계측기술 축적을 위해 최초 계측기 설치업체에서 무상보증기간까지 계측 측정, 계측결과 개략분석 및 유지관리가 되어야 할 것이다.

5) 계측은 각 전문분야의 종합적인 기술력과 계측기기의 정밀도, 정확도, 내구성이 요구되는 분야이므로 계측업체 선정시 계측기술력이 가장 우선 순위가 되어야 하며, 계측 기술수준 향상을 위해 계측 계획시 계측전문가 참여를 의무화하고, 계측 시공시는 계측 책임감리가 투입되어 계측 각 시공단계별로 계측관리가 되도록 하는 방안이 필요하다.

6) 대부분 계측기기는 계량 및 측정에 관한 법률 시행규칙에 따라 검교정 대상이 아니며, 국가 표준 및 검인증 기준이 없어 계측업체 자체 검교정으로 대체되고 있어 계측기기의 공신력 확보를 위해서는

국산 계측기기인 경우 공업진흥청에서 검교정 항목과 시험방법을 제정하고, 전국에 등록되어 있는 교정 검사기관의 계측기기 검교정 설비를 확충하여 검교정하는 방안과 계측 전문업체로 구성되는 가칭 건설 계측협회를 설립하여 주기적인 검교정이 되도록 하는 방안이 있으며, 외산 계측기기인 경우 자국 또는 국제적으로 인증받은 기관의 검정 증명서를 계측기기 납품시 제출 받는 방법 또는 검교정 방법에 의해 국내 공인기관에 의뢰하는 방법 등이 있다.

## 참고문헌

1. 과학기술 (1999), “현장설계계측 계획법”, p74
2. 남순성 (1999), “국내 터널 계측관리의 문제점 및 대책”, 터널기술 창간호, 대한터널협회, pp98~103.
3. 대한터널협회 (1999), “터널표준시방서”, pp136~138.
4. 배규진, 이성원 (1998), “지하구조물 유지관리 및 계측”, 대한토목학회지 제46권 제11호, pp43~54.
5. 서울특별시 도시철도공사 (1998,1999), “'97~98도시철도 토목구조물 변위측정 최종보고서”.
6. 서울특별시 도시철도공사 (1999), “지하철 시설물의 계측관리”, pp18~42.
7. 서울특별시 지하철건설본부 (1999), “지하철 구조물 내구성 확보를 위한 설계, 시공 및 유지관리지침 (안)”, 대한토목학회, pp1~2.
8. 신동훈, 김완영, 정우성 (1999), “배면 및 압밀 그라우팅이 콘크리트 라이닝의 안정성에 미치는 영향 연구”, 한국수자원공사 수자원연구소, pp82~88.
9. 신풍컨설턴트 (1999), “서울지하철 2기2단계구간 영구계측 시행검토”, 서울특별시 지하철건설본부, pp5~10.
10. 우종태 (1997), “한강 하저터널 구조물 설계 및 시공(II)”, 서울특별시 지하철건설본부, pp89~154.
11. 우종태, 양태선, 구재동 (1998), “하저터널 품질확인 및 유지관리 계측 연구”, 한국구조물진단학회 논문집 제2권 제2호, pp185~194.
12. 장승필 (1998). “토목 구조물에 대한 유지관리 계측의 현황과 전망”, 대한토목학회지 제46권 제11호, pp5~13.
13. 한국고속철도건설공단 (1999), “경부고속철도 시험선 구간 안전계측설비 구축”
14. 한국도로공사 (1997), “특수교량의 계측 시스템 구축과 시공방법 개발 연구”, p285.
15. 한국전산구조공학회 (1996), “교량 및 지하구조물의 현장 계측관리”
16. A.I Feldman, J.B McRae (1999), “5th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics”, pp95~100.
17. B.Leger, J.C.Roussel (1997), “Ten Years of Geotechnical Measurements through Chamoise Tunnel Marls”, France, pp1309~1312.
18. Colin S. Harris, Malcolm B. Hart (1996), “Engineering Geology of the Channel Tunnel”, pp277~294.