

# 최신 IT기술로 업그레이드된 서울지하철 터널 유지관리 계측시스템 소개



**서강천**  
서울특별시 도시철도공사  
시설관리처장



**우중태**  
경북대학  
토목설계과 교수



**이성기**  
태조엔지니어링  
부사장



**강경구**  
에이티맥스  
대표이사

## 1. 서론

### 1.1 과업수행 개요

본 과업은 1995년 서울지하철 5호선 터널 유지관리 계측시스템으로 설치된 터널 내 각종 계측기기에 대하여 1995년부터 2004년까지 관리하던 방식을 개선하는 것이다. 개선내용은 기존 1단계(5호선) 계측시스템의 업그레이드 및 도시철도 자가망을 활용한 계측통신망 구축으로 이원화된 현장계측실(마포, 강동)을 계측종합상황실로 통합구축함으로써 현재의 2단계(6, 7호선)와 동시 모니터링을 통한 도시철도 터널구조물의 24시간 감시체계를 구축하는 것이다. 과업기간은 2004년 12월부터 2005년 10월 까지 수행되었다.

### 1.2 과업수행 내용

본 과업의 주된 내용은 크게 4가지로 정리할 수 있다. 첫 번째는 대표단면 계측으로 수행하고 있는 터널 라이닝

응력, 토압, 간극수압 등을 측정하는 진동현식 센서와 내공변위 측정을 위한 전기식센서, 역시 2차원 내공변위 측정을 위한 광섬유센서에 대한 업그레이드 및 교체를 실시하는 것이다. 두 번째는 통합계측관리를 위하여 도시철도 자가망을 활용한 계측통신망을 구축하는 것이다. 세 번째는 이러한 계측시스템을 보다 효율적으로 관리하기 위한 통합모니터링 프로그램을 개발하는 것이며, 마지막 네 번째는 시험운영을 통한 개선된 계측시스템의 신뢰도 및 안정성을 확보하는 것이다.

이를 항목별로 세부적으로 언급하면 다음과 같다.

#### (1) 계측시스템 업그레이드 및 교체

- 전기식센서 : 자동계측을 수동계측으로 변환
- 진동현식센서 : 데이터로거 교체 및 자동계측으로 변환
- 광섬유센서 : E-box 검교정, 광섬유 전용 프로그램개발, 리버스 엔지니어링을 통한 센서교정

#### (2) 도시철도 자가망을 활용한 계측통신망 구축

- 통신케이블, 통신주변기기 설치
- 통신컨트롤러 및 프로토콜 변환 등 통신 프로그램 개발

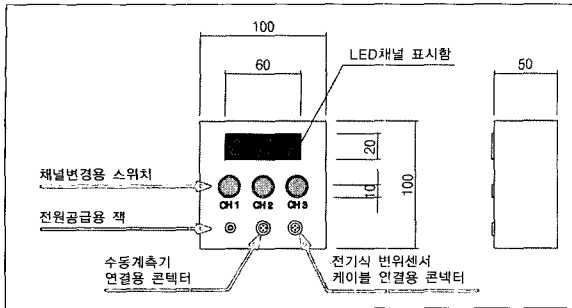


그림 1. 현장 수동단자함

(3) 통합 모니터링 프로그램 개발

- 실시간 모니터링, 계측기기 제어, 통신 제어, 터널 안정성 분석, 계측데이터 분석 등의 기능구현

(4) 계측시스템 시험운영 및 결과분석

- 개선된 계측시스템의 시험운영
- 계측결과 정밀분석

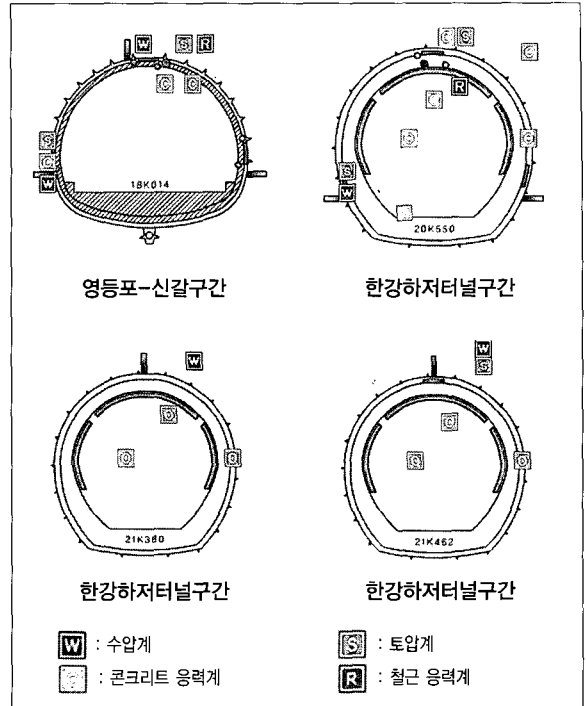


그림 2. 대표단면 계측센서 설치도

## 2. 계측시스템 업그레이드 및 교체

### 2.1 전기식 변위센서 수동계측 전환

기존에 전기식 센서는 터널의 라이닝 축방향 변위를 측정하는 것으로 총 23단면에 대하여 설치 운영되어 왔다. 금번에 전기식 변위센서는 23단면 모두 수동계측으로 전환하였으며, 수동계측의 효율성을 향상시키기 위하여 현장에 수동단자함을 설치하여 계측방식을 그림1과 같이 개선시켰다. 또한 현장에서 계측한 데이터는 USB 이동 디스크로 저장하고 이를 통합계측관리 프로그램에 업로딩하여 사용자가 계측결과를 일일이 입력하는 과거 방식을 개선하였다.

### 2.2 대표단면 자동계측시스템

대표단면 계측은 총 4개소에 대하여 콘크리트라이닝

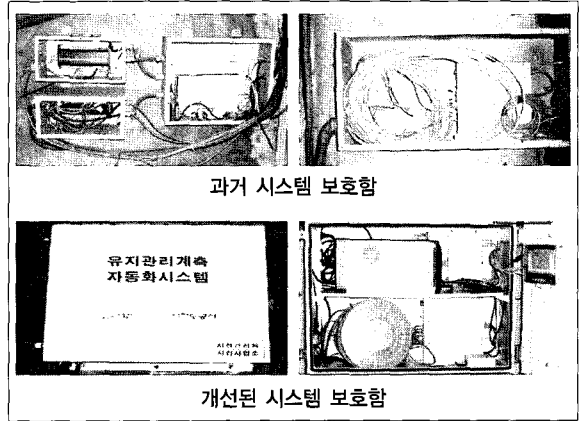
응력 및 철근응력, 토압, 간극수압을 측정하고 있으며, 계측센서 설치형태는 그림 2와 같다.

기존 대표단면 계측방식은 데이터 수집을 위해 전동차 운행이 완료된 새벽시간에 터널내로 인력을 투입하여 수행하는 등 계측관리에 어려움이 많았다. 이러한 어려움을 근본적으로 해결하기 위하여 대표단면 4개소에 설치된 센서들을 자동계측할 수 있도록 시스템을 업그레이드 하였으며, 이에 대한 계측결과 모니터링은 계측종합상황실에서 할 수 있도록 하였다.

표 1은 시스템 업그레이드를 위하여 사전에 현장 정밀점검을 실시하였는데, 이에 대한 세부내용을 정리한 것이다. 점검결과, 장기 자동화 유지관리 계측시스템에 적합한 계측장비와 주변기기를 선정하여 교체 설치하였고, 신규 구축 장비의 보호 및 운영을 위하여 시스템 보호함을 설계 제작하여 구축하였다.

표 1. 현장 정밀점검 내용

구분	세부사항
진동현식 센서	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기존계측기(DT515)를 통한 계측</li> <li>• 진동현식 전용 지시계(ACE-800) 이용 측정</li> </ul>
계측시스템 (데이터로거)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 계측관리프로그램(Detransfer, 버전3.27) 구동 여부</li> <li>• 계측결과 저장 및 취득 가능 여부</li> <li>• 케이블 배선도 확인</li> <li>• 장비 공급 전원, 센서인가 전원 확인</li> </ul>
기존계측 결과 정리 및 분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기존계측결과 정리(보고서, 서버 PC저장 데이터)</li> <li>• 계측데이터 분석 방법 확인</li> <li>• 계측센서 이상 유무 이력 확인</li> </ul>



과거 시스템 보호함

개선된 시스템 보호함

사진 1. 시스템 보호함

## 2.3 계측시스템 보호함 설치

계측시스템 보호함은 계측데이터의 안정적인 수집 및 통신을 위해서는 매우 중요한 부분이다. 과거에는 계측기 기별로 독자적으로 구성되어 관리상에 어려움이 많았다. 금번에는 이를 통합하고, 자가망 통신을 위해 현장 계측서버인 산업용 PC를 업데이트 하였다. 또한 현장에 터치스크린 모니터를 설치하여 현장점검시 사용자가 산업용 PC를 통해 계측되는 모습을 손쉽게 점검할 수 있도록 하였다.

사진 1은 과거에 설치된 시스템 보호함과 개선된 시스템 보호함을 보여주고 있다.

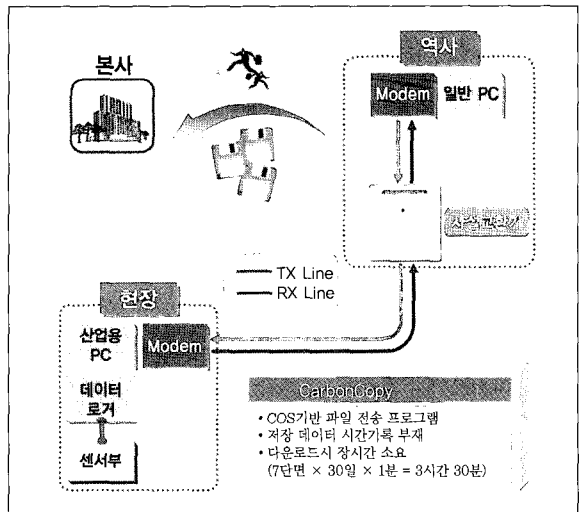


그림 3. 과거 계측통신형태

## 3. 통합시스템 자가망 구축

### 3.1 시스템 구성

그림 3은 과거 계측시스템에 대한 통신 구성을 보여주고 있다. 과거에는 MS-DOS기반의 통신프로그램을 사용하고 있었으며, 현장 토크분소에 분산 설치되어 사용자가 계측데이터를 수집하기 위하여 매번 현장 토크분소를 방문하는 등 번거로움이 많았다.

개선된 통신구성을 그림 4에 제시하였다. 개선된 통신

망은 크게 도시철도 자가망인 디지털 전송설비망과 도시철도공사 사내 인터넷망을 이용하였다. 이런 자가망을 통하여 본사에 있는 계측종합상황실에서 전 구간에 설치된 각종 센서들을 실시간을 수집 및 모니터링이 가능하게 되었으며, 현장에 설치된 계측데이터에서 이상신호가 발생하였을 때에도 이를 모니터링하여 즉각적인 조치가 가능하도록 하였다.

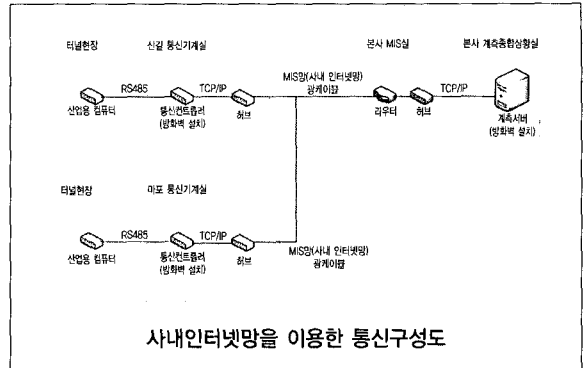
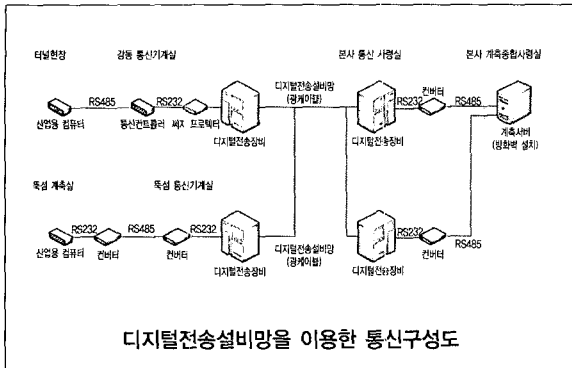


그림 4. 통합시스템 자가망 통신구성도

### 3.2 통신프로토콜 및 프로그램 개발

통신 프로토콜은 현장 계측데이터를 도시철도 자가망에 연결하기 위한 중간연계 프로토콜을 의미한다. 멀티그룹 통신망에서의 정확하고 신속한 데이터전송을 위해 시리얼 통신 프로토콜 및 TCP/IP 통신시 필요한 프로토콜을 개발하였다. 또한 향후 통신방법 변경에 따른 호환성 측면을 고려하여 개발하였으며, 통신프로그램 구성은 그림 5와 같다.

하드웨어 측면에서는 통신 컨트롤러가 추가로 설치되었는데, 통신 컨트롤러의 기능은 다음과 같다.

- 현장계측 산업용 PC와 자가망 활용 계측통신망의 중간 연계점
- 각각의 계측데이터를 통합하여 프로토콜 변환후 전송
- 원활한 통신을 위한 통신 버퍼기능
- 계측데이터 저장기능
- 현장 계측장비의 감시진단 기능

## 4. 광섬유센서 및 E-box 검토

### 4.1 광섬유센서 시스템

광섬유센서는 전기식변위센서와 마찬가지로 터널의

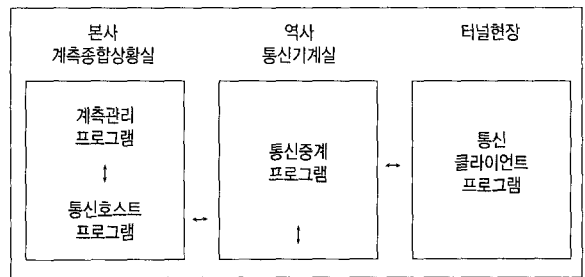


그림 5. 통신프로그램 구성

측방향 변위를 측정하기 위하여 설치되었다. 설치개소는 총 7단면에 설치되어 있으며 설치단면 형태는 그림 6과 같다. 광섬유센서는 설치당시 외국기술을 도입하여 설치하였으며, 통신프로그램 및 변위환산 등에 대한 세부내용을 파악하기가 곤란하였다. 따라서 관리자가 이상 계측신호 발생시 이에 대한 대처 및 조치가 원활하게 이루어질 수 없었으므로 금번에 광섬유센서에 대한 리버스엔지니어링 및 광섬유센서에 광량을 공급하는 E-box에 대한 검토, AD변환기 등에 대하여 업그레이드를 실시하였다.

광섬유센서 시스템에 대한 개요도는 그림 7에서 보는 바와 같이 광섬유 센서의 광량변화를 E-box에서 취득한 후, 이를 volt값으로 출력하고, 다시 산업용 PC에서 AD 변환을 거쳐 변위환산을 한 후, 사용자가 변위값을 관리하도록 되어 있다.

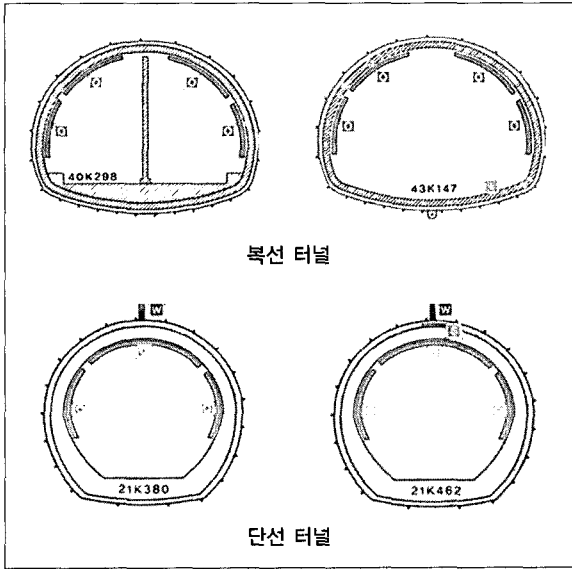


그림 6. 광섬유센서 설치단면도

먼저 광섬유센서 시스템에 대한 업그레이드를 위하여 점검방법은 그림 8과 같이 크게 두 가지를 적용하였다. 첫 번째는 OTDR을 사용한 센서를 이용하여 이상 유무를 파악하였고, 이상이 있는 센서의 경우에는 다시 기존 광섬유센서 원리와 동일하게 광소스 및 광 파워미터를 사용하여 재점검을 실시하였다.

정상적인 센서(광케이블)인 경우에는 센서의 Input쪽과 Output쪽 양방향으로 측정한 광케이블 거리가 서로 같아야 한다. 양방향 측정결과 거리가 서로 다른 경우 센서가 이상 있는 것으로 판단하였으며, 또한 거리가 서로

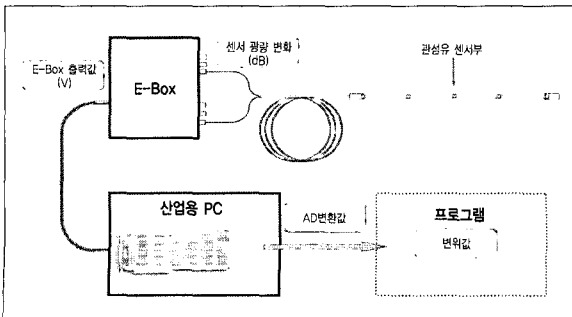


그림 7. 광섬유센서 시스템

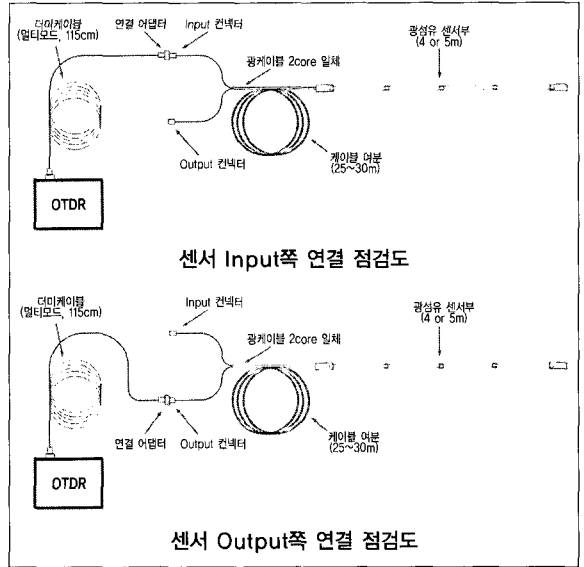


그림 8. 광섬유센서 점검방법

일치하나 두 파형이 서로 상이한 경우에는 파형의 형태를 분석하여 센서이상을 판단하였다.

## 4.2 E-box 검교정

광섬유센서의 측정장비인 E-box는 그 내부에 광을 내보내는 광소스(Light source)가 커플러로 연결되어 채널별로 광을 분배하여 각각 센서부로 광을 쏘아 Output에 설치된 PD (Photo Diode)에서 감쇠된 광량을 측정하여 전압값(V)으로 변환하는 장비이다. 금번과업에서는 과거 광섬유센서 시스템의 각종 변환과정 및 계수 등의 자료가 전무하여 전체적인 리버스엔지니어링을 통한 업그레이드를 실시하였다. 이를 위하여 E-box에 대한 검교정을 실시하고, 자체 지그를 제작하여 보정계수 등을 도출하였다. 자체 제작한 지그부분도 검교정을 실시하였다.

검교정은 한국표준과학연구원 환경안전계측센터 스마트계측그룹에서 실시하였으며, 그 결과 1%미만의 오차를 얻어 가지게 되었다.

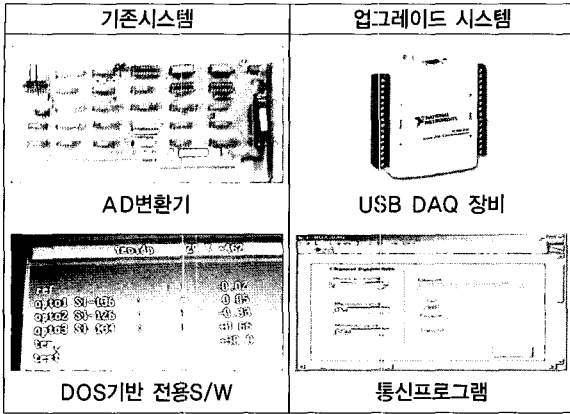


그림 9. 기존시스템과 업그레이드된 시스템

### 4.3 AD변환기 업그레이드

기존 산업용 PC에 설치된 AD변환기 부분에 대해서는 산업용 PC를 전면 재 교체 하였으므로 이 부분에 대한 전면 업그레이드 실시되었다. 주된 주안점은 계측현장에 소형의 Embedded PC를 사용하기 위해서 PCI 나 ISA 슬롯을 사용하지 않는 USB 타입의 DAQ를 사용하였다. 그림 9는 기존 시스템과 업그레이드된 시스템을 비교한 것이다.

## 5. 통합 운영프로그램 개발

### 5.1 프로그램 구성

본 과업에서의 업그레이드 및 통합 구축된 유지관리 계측시스템은 터널에 설치된 계측기기 및 센서를 계측종합 상황실과 통신시스템으로 연결하여 데이터 수집을 시간 과 장소의 제약 없이 원격으로 수행할 수 있도록 하였다. 자동계측 장비에 대해서는 정해진 시간에 자동으로 계측 데이터가 수집되도록 설정할 수 있다. 사무실에서 24시간 원격으로 모든 계측업무를 수행할 수 있도록 구성하였

으며 통합운영프로그램은 다수의 PC에서 여러 사용자가 접속하여 계측 업무를 수행할 수 있고, 손쉽게 운영할 수 있도록 웹기반으로 개발하였다.

또한 향후 다른 사양의 센서를 관리할 경우에도 손쉽게 수정이 가능한 호환성 있는 프로그램으로 개발하였다. 통합 운영프로그램은 크게 3가지로 구분되어 개발하였으며 다음과 같다.

#### (1) 산업용 PC 프로그램

- 광섬유센서 데이터 계측프로그램
- 진동현식 데이터 로거 계측프로그램
- 계측데이터 DB프로그램
- 통신 프로토콜 송수신 프로그램
- UPS제어, 이상신호 발생시 정보전송 프로그램

#### (2) 통신관련 프로그램

- 향후 통신방법 변경에 대처하기 위한 프로토콜 변환 기능
- 시리얼-TCP/IP 변환기능
- 거리에 따른 통신특성 테스트, 멀티드롭 통신테스트, Host 제어 프로토콜

#### (3) 통합운영 프로그램

- 계측데이터 저장, 확인 및 그래프 기능
- 계측기기 제어(E-box, CR10X)기능
- 통신제어 기능(통신 컨트롤러, 현장 PC)
- 터널 안정성분석
- 보고서 작성

### 5.2 전체 시스템 구성

유지관리 계측시스템을 구성하는 소프트웨어로는 응용 수준에서 Delphi 기반의 C/S 응용 프로그램, 웹 서비스를 위한 Java/JSP 기반의 웹 프로그램을 구현하였다.

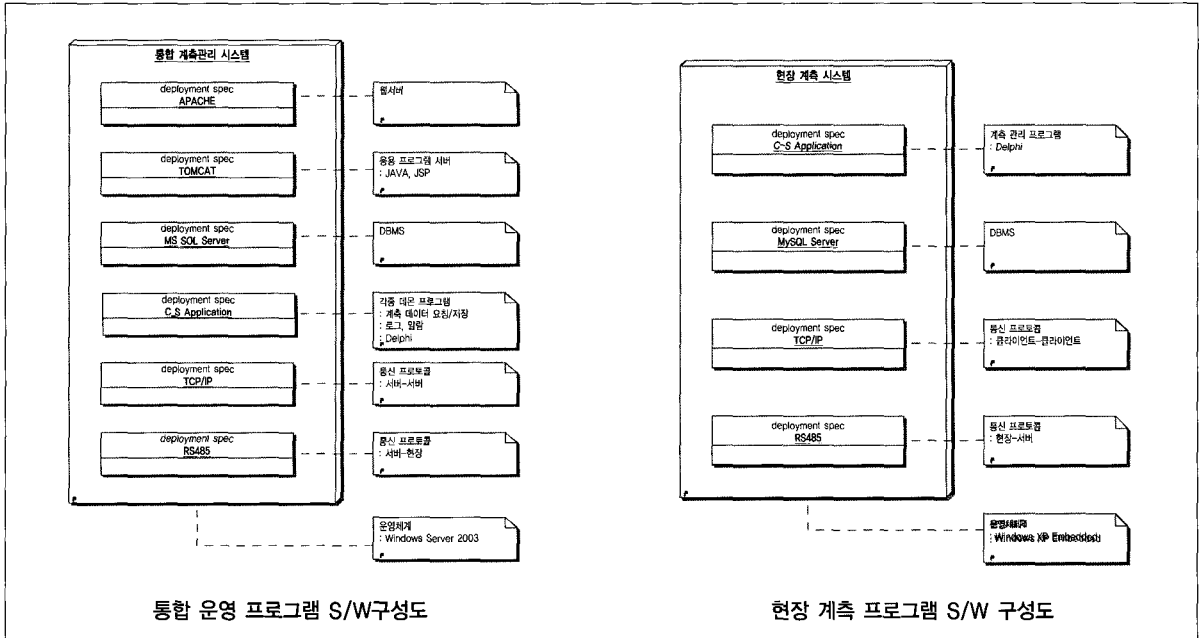


그림 10. 소프트웨어 구성도

표 2. 통합운영프로그램 메인메뉴

메인메뉴	서브메뉴	메인메뉴	서브메뉴
로그인		수동계측	결과분석
계측정보	설치단면	관리	결과입력
	계측시스템	경보/장애	관리현황
	사진	관리	경보이력
	도면		보고서작성
자동계측 관리	실시간계측	보고서	보고서목록
	결과분석		계측시스템
	청담대교	시스템관리	계측관리
	데이터입력		사용자관리

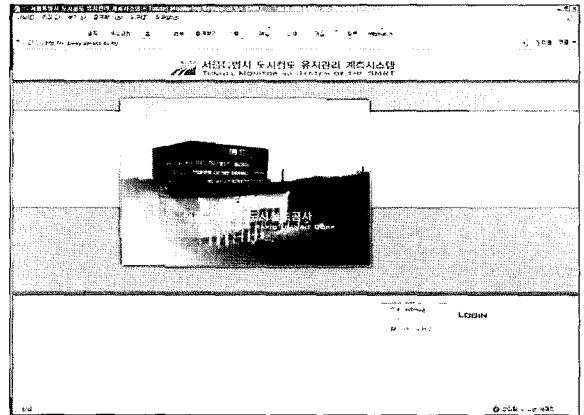


그림 11. 로그인 화면

데이터베이스 서비스를 위해서는 SQL Server DBMS가 사용되었으며, 네트워크 통신은 OS에서 제공하는 시리얼 통신과 TCP/IP 기반에서 이루어졌다. 그림 10은 소프트웨어 구성도이다.

네트워크 구성은 향후 통합 및 업그레이드를 위해 시리얼 통신 신호(RS232)를 TCP/IP 프로토콜로 변환하여 통신할 수 있도록 구성하였다.

### 5.3 주요 기능

통합운영프로그램에 대한 메뉴는 표 2와 같다. 그림 11~그림 17은 주요 기능들에 대한 대표적인 시스템화면이다.

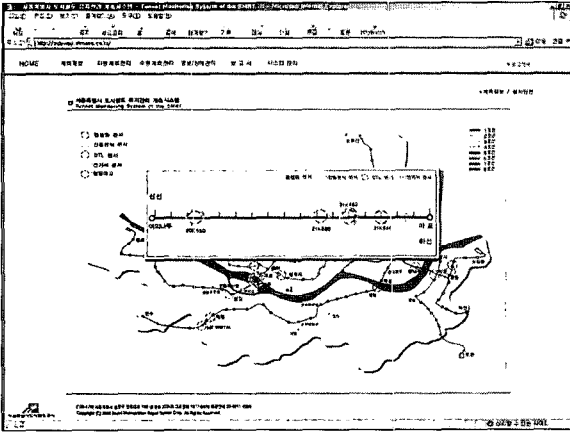


그림 12. 센서설치 단면

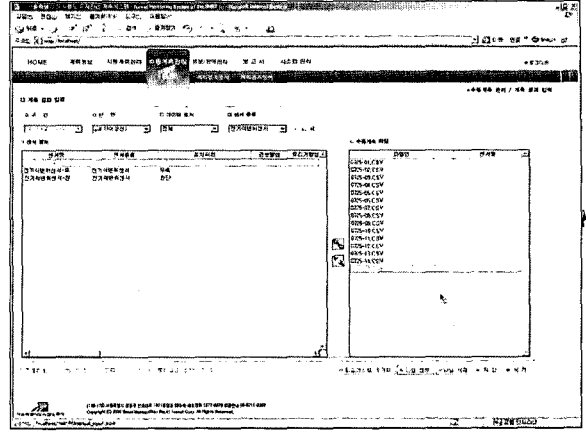


그림 15. 수동계측 데이터 업로딩 화면

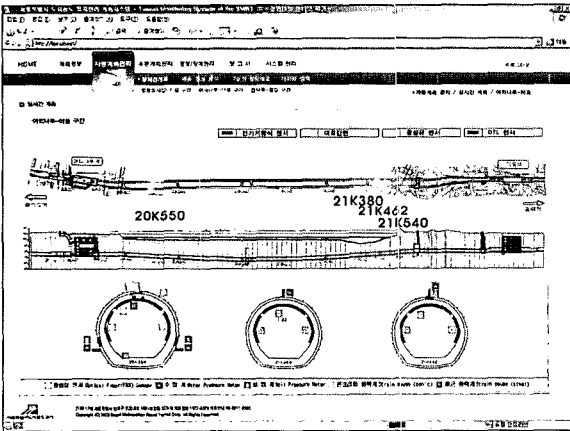


그림 13. 실시간 계측 화면

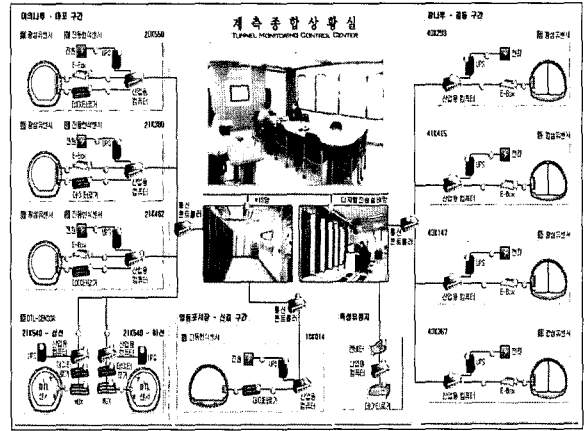


그림 16. 시스템 장애유무 관리화면

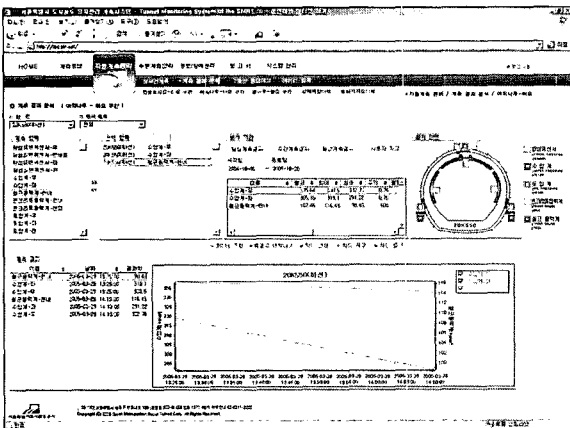


그림 14. 결과분석 화면

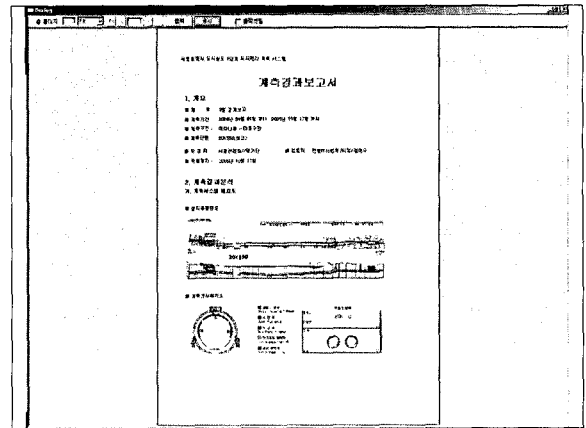


그림 17. 보고서 미리보기 화면



## 5.4 종합상황실 구축

과거 계측기기가 설치된 토목분소를 방문하여 관리하는 방식을 본사에 위치한 계측 종합상황실에서 전체구간을 한눈에 파악할 수 있도록 하였다. 종합상황실에서는 터널의 변위상태를 과학적이고 체계적으로 측정, 관리하여 구조물의 이상변위를 조기발견하고 이에 대한 대책을 수립하는 장소로 활용될 것이다. 종합상황실에는 계측 중앙서버 및 주변기기, 냉방제습장치, 관리용 PC, 현황판, 프린터로 구성되어 설치되었고, 인터넷망을 구축하여 원격지에서 통합계측관리 프로그램에 접속이 가능하도록 하였다.

- 광섬유 계측센서 기기교체 및 보완
- 대표단면계측 데이터로거 교체(자동전환)
- 자가망을 활용한 계측통신망 통합구축
- 통합운영프로그램 개발
- 전기식 변위측정 시스템 수동단자함 설치
- 유지관리계측 시행 및 분석 등

## 감사의 글

본 과업이 진행되는 동안 큰 도움을 주신 서울특별시 도시철도공사 시설관리처(최동수팀장, 김정수과장, 안승용대리, 백인혁주임) 관계자 분들께 감사의 마음을 전합니다.

## 6. 결론

본 과업은 기존에 관리해오던 서울 지하철 2기 1단계 구간에 대한 계측시스템을 전면 개선하여 사용자가 보다 손쉽게 유지관리 할 수 있도록 하였다는 점에서 의미가 크다. 계측시스템은 터널 구조물의 유지관리를 위해서 보다 효율적인 방식임에도 불구하고, 계측기기의 하자 및 이상신호 발생 등으로 본연의 취지에 부합되지 못한 부분이 많이 있었다.

금번 과업을 통하여 2기 1단계의 계측시스템은 선진외국의 계측시스템과 비교하여 전혀 손색이 없는 우위의 시스템으로 거듭 도약하였다. 본 업그레이드 및 통합구축 과업내용을 정리하면 다음과 같다.

## 參考文獻

1. (주)바이텍코리아, (주)에이티맥스, "1단계 유지관리 계측시스템 업그레이드 및 통합구축용역 기술제안서", 2004.11, pp.1~141.
2. 서울특별시도시철도공사 계측기술평가단, "1단계 유지관리 계측시스템 업그레이드 및 통합구축용역 중간평가보고서", 2005.6, pp.1~135.
3. 서울특별시도시철도공사 계측기술평가단, "1단계 유지관리 계측시스템 업그레이드 및 통합구축용역 최종평가보고서", 2005.10, pp.1~135.
4. 우종태, 정계갑, "1단계 계측시스템 통합구축 시행에 관한 연구용역", (사)한국구조물진단학회, 서울특별시도시철도공사, 2004.7, pp.1~198.