

# 다중 노드 네트워크를 이용한 내공변위 계측 시스템

(Design of Inner Section Displacement Measurement System  
Using Multiple Node Networks)

서석훈\* · 우광준\*\*

(Suhk-Hoon Suh · Kwang-Joon Woo)

## 요 약

본 논문에서는 터널의 내공변위를 측정하고 측정된 데이터를 효율적으로 관리하는 계측 시스템을 설계하였다. 계측 시스템은 마이크로컨트롤러와 포텐시오테터형 변위센서로 구성되는 Intelligent Sensing Head와 계측 시스템을 운영하고 측정된 데이터를 관리하는 호스트 컴퓨터로 구성된다. Intelligent Sensing Head와 호스트 컴퓨터는 다중노드 통신방식에 의하여 연결되며 다중노드 네트워크의 안정된 동작을 위하여 Daisy-Chain 형태로 네트워크를 구성하였고 Fail-Safe 회로를 설계하였으며 Modbus 프로토콜을 사용하여 시스템의 범용성을 높였다. 호스트 컴퓨터는 종합관리 소프트웨어에 의하여 다양한 측정조건을 선택할 수 있으며 데이터베이스를 이용하여 측정된 데이터를 관리한다. 설계된 시스템은 터널에 설치되어 효율성을 확인하였다.

## Abstract

In this paper, we design tunnel inner section displacement measurement system which is composed of potentiometer-type displacement sensors, microcontroller-based intelligent sensing head, and host computer for the management system and acquisition data. Multiple node communication bus connects the intelligent sensing heads with the host computer. For safe and reliable network operation, we use daisy-chain configuration, termination resistor, fail-safe biasing circuit. For the enhancement of system utilization, we use modbus protocol. The acquisition data are transmitted to host computer and managed by database. Several data request conditions and sorting conditions are provided by management software. The utilization of designed system is confirmed by experiment.

key words : Multi-rod extensometer, Intelligent sensing head, Multiple node

## 1. 서 론

Multi-Rod Extensometer는 터널공사에 필수적으로 활용되는 소모성 자재로, 터널 굴착시 배면에서 발생하는 변위 및 터널 완공 후 내공 변위를 측정하는 센서이며 28[mm] 직경으로 천공된 홀에 4~6개의 다단구조로 설치하도록 설계되어있다. 최근에는 지하철이나 고속전철 등 대규모 터널의 증가로 6단 까지 설치하는 경우도 생기고 있으며 그 수요 또한

\* 정회원 : 단국대학교 전자공학과 박사과정  
E-mail : shsuh@anseo.dankook.ac.kr  
\*\* 정회원 : 단국대학교 전자공학과 교수  
접수일자 : 2001년 8월 8일  
1차심사일 : 2001년 8월 20일  
심사완료일 : 2001년 9월 28일

증가추세에 있다. 그러나 변위 측정시 작업 조건의 제약과 다른 공정에 의한 시간적 제약을 받게 되며, 측정자별 측정오차로 인하여 변위 양상이 다르게 나타나므로 신뢰성이 떨어지는 문제를 갖고 있다.

본 논문에서는 건축, 토목 분야 계측의 항시성, 안정성과 신뢰성을 높이기 위하여 Intelligent화한 전자식 Multi-Rod Extensometer를 설계하였고 RS-485 비동기통신과 Modbus 프로토콜을 이용한 네트워크를 구성하여 종합관리 시스템을 구성하였으며, 이를 터널 현장에 적용하여 성능을 검증하였다.

전체 시스템은 각 Rod의 기계적 변위량에 대하여 선형적으로 전압이 출력되는 선형 포텐시오미터들로 구성된 변위센서와 마이크로컨트롤러를 기본으로 구성된 Intelligent Sensing Head, 그리고 호스트 컴퓨터로 구성된다. 포텐시오미터에 의하여 전기적 신호로 변환된 변위량은 마이크로컨트롤러와 A/D 변환기에 의하여 디지털 데이터로 변환되며, 변환된 디지털 데이터는 RS-485 통신 선로를 통하여 실시간으로 호스트 컴퓨터로 전송된다. Intelligent Sensing Head는 계측지점에 설치가 되므로 환경변화에 강해야 하고 크기가 작아야 하므로 마이크로컨트롤러를 기본으로 한 회로를 구성하였으며 데이터 전송의 신뢰성을 높이기 위하여 RS-485 통신을 사용하고, Modbus 프로토콜을 이용하여 시스템의 범용성을 높였다.

호스트 컴퓨터에 수신된 변위 데이터는 각 센서별로 Look-Up 테이블에 의하여 보정되고 데이터베이스에 의하여 관리된다. 호스트 컴퓨터에서 보정을 함으로서 마이크로컨트롤러의 프로그램 크기를 줄일 수 있으며 센서가 바뀔 경우에 호스트 컴퓨터의 Look-Up 테이블만 바뀌면 되므로 쉽게 대처할 수 있도록 하였다. 이와같이 제작된 시제품은 터널 현장에 설치되어 그 성능 및 효용성을 검증하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 Intelligent Sensing Head에 대하여 소개를 한 후 3장에서 시스템 구성에 사용된 네트워크와 프로토콜에 대하여 서술하고 4장에서 호스트 컴퓨터에 구현된 종합관리 프로그램의 구성에 대하여, 5장에서는 실험결과를 기술하고 마지막으로 6장에서 결론을 맺었다.

## 2. Intelligent Sensing Head

현재는 내공변위를 측정하기 위하여, 스텐레스 봉

으로 만든 단순구조체를 200~500[m] 간격으로 터널의 천단부 크라운부 벽체에 각각 설치하여 다이알 게이지로 측정하고 있으나, 대차등 보조 기자재의 도움이 필요하며 또한 측정자, 측정 환경에 따라 측정 오차가 발생하는 단점이 있다. 최근에는 신뢰성이 높은 인덕션 방식의 변위센서를 사용하기도 하는데, 이 방식의 센서는 측정 정밀도는 높으나 코일의 권선수와 마그네틱 구조 그리고 전자유도 차폐구조 문제로 직경이 커져 설치 및 관리상 문제점과 경시변화에 취약한 단점이 있다. 또한, 커패시티브형 변위센서는 측정 정밀도는 높으나 측정 가능한 기계적 변위량이 작은 단점이 있다.[1] 따라서 본 연구에서는 Multi-Rod의 기계적 변위량에 대하여 선형적으로 DC전압이 출력되는 다중-포텐시오미터를 그림1과 같이 설계, 제작하여 기계적 변위센서로 사용하였다.

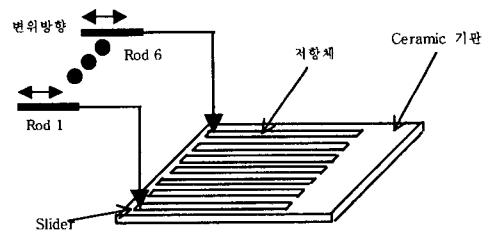


그림 1. 다중-포텐시오미터형 변위센서  
Fig. 1. Displacement sensor of Multi-Potentiometer type

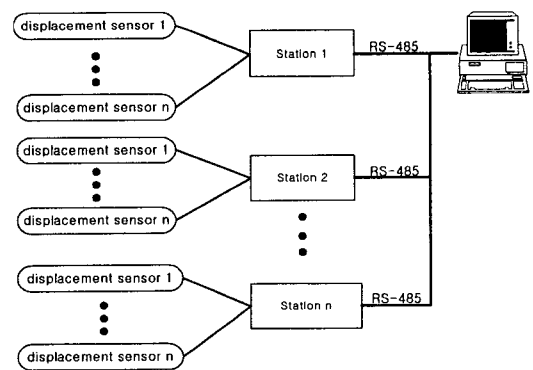


그림 2. 계측시스템의 전체구성  
Fig. 2. The configuration of measurement system

제작된 다중-포텐시오미터형 변위센서는 세라믹 기판 위에 저항체를 부착하여 제작하였으며 변위가 생기면 저항체 표면을 움직이는 슬라이더에 의하여

## 다중 노드 네트워크를 이용한 내공변위 계측 시스템

저항값이 바뀌게 된다. 저항값은 Intelligent Sensing Head에 의하여 디지털 데이터로 변환된 후 Modbus 프로토콜에 의하여 호스트 컴퓨터로 전송된다. Modbus 프로토콜의 주소필드는 1 바이트로 고정되어 있으므로 Intelligent Sensing Head는 최대 255개의 Station을 네트워크에 연결할 수 있으며, 1개의 Station에는 최대 6개의 변위센서를 설치할 수 있다. Intelligent Sensing Head는 AT89C52 마이크로콘트롤러와 12 bit A/D 변환기를 사용하여 설계하였고[2] 호스트 컴퓨터와의 통신은 RS-485 네트워크를 통하여 실시간으로 이루어진다. 그림2는 내공변위 계측 시스템의 전체적인 구성을 나타내고 있다.

### 3. 통신 네트워크

터널에 설치된 Intelligent Sensing Head로 부터 멀리 떨어져 있는 현장 사무소까지 데이터를 왜곡 없이 전송하기 위하여 RS-485 네트워크를 구축하였으며 신뢰성을 향상시키기 위하여 Daisy-Chain 방식으로 네트워크를 구성하였고, Fail-Safe Biasing 회로를 설계하여 잡음의 영향을 최소화 하였다. 또한, Modbus 프로토콜을 사용하여 Intelligent Sensing Head와 종합관리 소프트웨어의 범용성을 높였다.

#### 3.1 RS-485 네트워크

RS-485 비동기 통신은 다중 노드들과 양 방향 통신을 비교적 용이하게 구현할 수 있는 통신 방식으로 평형전송방식을 사용하여 잡음이 Common 모드 성분으로 나타나게 되며, 이 성분은 차동형 수신기에 의하여 제거되므로 다른 통신 방식에 비하여 데이터의 전송 길이가 길고 잡음에 강한 특징을 가지고 있다. 그림3은 RS-485 비동기 통신의 구성을 보이고 있다. 그림3에서는 1개의 Twist Pair 전송선에 여러 노드들의 Transceiver(Differential Driver(D))와 Differential Receiver(R)들이 연결되어 있다. 전송선로로부터 각 노드의 Transceiver까지의 거리를 Stub 길이라고 하며, Stub 길이는 6[inch]이내로 짧아야 하므로[3] Sensing Head의 PCB상에 코넥터를 설치하여 Stub 길이를 최대한 짧게 하였다.

RS-485 버스는 전송선로로 동작하므로 통신의 신뢰도를 높이기 위해서는 반사파를 억제하여야 하며, 네트워크를 그림4와 같이 Daisy-Chain 방식으로 구

성하는 것이 가장 효율적이다. 반사파를 억제하기 위하여 임피던스 정합을 시켜야 하며 이를 위하여 RS-485 케이블의 양쪽 끝에 종단 저항을 설치하였다. 그림5와 같이 호스트 컴퓨터측의 Source 저항  $R_{T2}$ 는  $120[\Omega]$ 을 사용하였고, 가장 끝 노드에는 RS-485 버스에 연결되어 있는 모든 노드의 드라이버가 비활성화된 경우에도 버스가 특정 상태를 가질 수 있도록 하기 위하여 종단저항과 함께 Fail-Safe Biasing을 함께 해주었다. RS-485 버스의 Tx/Rx+와 Tx/Rx-간의 전위차가  $200[mV]$ 보다 작을 경우 외부의 잡음에 영향을 받기 쉬우므로 Tx/Rx+와 Tx/Rx-간의 전위차 ( $V_{FSB}$ )를  $200[mV]$ 보다 크게 유지 시켜 주어야 하며[4] 이를 위하여 저항값  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_{T1}$ 을 정하였다.

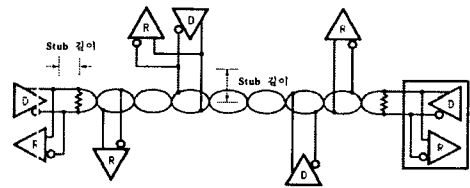


그림 3. RS-485 비동기 통신의 구성  
Fig. 3. RS-485 network configuration

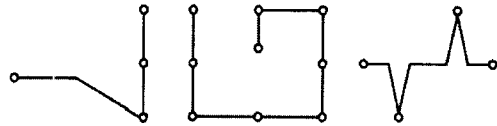


그림 4. Daisy-Chain 방식의 네트워크 구성  
Fig. 4. Daisy-Chain network scheme

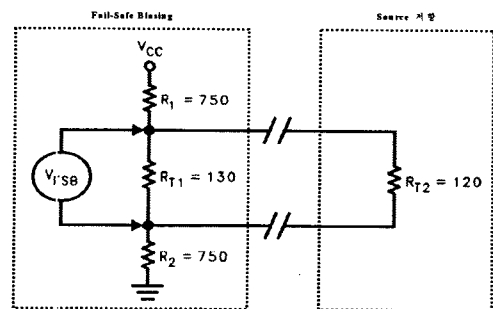


그림 5. 종단저항과 Fail-Safe Biasing  
Fig. 5. Termination resistor and Fail-Safe biasing

#### 3.2 Modbus 프로토콜

Modbus 프로토콜은 부가적인 하드웨어 없이 직렬

통신포트와 소프트웨어를 이용하여 구현할 수 있으므로, 프로토콜 구현에 전용 인터페이스가 필요한 다른 프로토콜에 비하여 저렴하게 구현할 수 있다. Modbus 프로토콜[5]은 네트워크상의 노드간의 Message Structure를 규정하고 있으며, 이 규정에 따라 한 노드에서 다른 노드로 데이터를 요구하거나, 다른 노드로부터 데이터를 요구받았을 때, 그리고 에러를 검출하기 위한 절차등이 정의되어있다. 그림6은 기본적인 Master와 Slaves간의 데이터 요구와 응답을 위한 프로토콜을 나타내고있다.

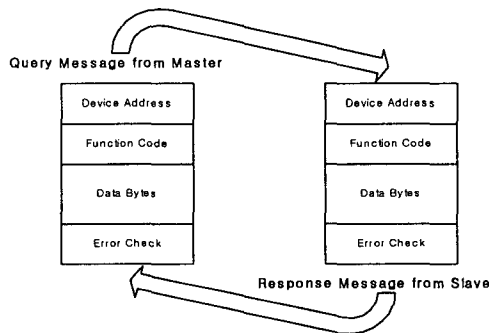


그림 6. Master-slave 요구, 응답 사이클  
Fig. 6. Master-slave query-response cycle

Master의 Query Message에 포함되어있는 Function Code는 주소를 가지고있는 Slave에게 요구하는 내용을 함축적으로 담고있으며, 계속되는 데이터 필드에는 Slave가 요구를 처리하는데 필요한 추가적인 정보들을 담고 있다. 데이터의 전송요구를 받은 Slave는 Function Code 필드에 Master로부터 수신한 Function Code를 넣고 데이터 필드에는 요구에 대한 응답을 실어서 전송한다.

Modbus 프로토콜은 데이터의 구성에 따라 ASCII(American Standard Code for Information Interchange)모드와 RTU(Remote Terminal Unit) 모드가 있으며 사용자가 모드를 선택할 수 있다. ASCII 모드는 8 비트의 데이터를 2개의 ASCII 문자(2 바이트)로 전송하며 RTU 모드는 8 비트의 데이터를 그대로 전송하므로 동일한 Baud Rate에서는 RTU 모드가 ASCII 모드에 비해 더 많은 데이터를 전송할 수 있다. 그림7, 그림8은 각 프로토콜의 구성을 보이고 있다. 그림8에서 T1-T2-T3-T4는 최소 3.5문자 시간의 인터벌을 나타낸다. 본 시스템에서는

사용자에게 친숙한 ASCII 모드를 채택하였으며, Master는 호스트 컴퓨터 그리고 Slave는 각각의 Station에 해당된다.

START	ADDRESS	FUNCTION	DATA	LRC CHECK	END
1 CHAR :	2 CHARS	2 CHARS	2 CHARS	2 CHARS	2 CHARS CRLF

그림 7. ASCII 모드 프로토콜  
Fig. 7. ASCII mode protocol

START	ADDRESS	FUNCTION	DATA	CRC CHECK	END
T1-T2-T3-T4	8 BITS	8 BITS	N x 8 BITS	16 BITS	T1-T2-T3-T4

그림 8. RTU 모드 프로토콜  
Fig. 8. RTU mode protocol

표 1. 변수 주소표  
Table 1. Variable address

변수주소	내용	변수구분	비고
0000	채널1(1번센서)변위값	Read	
0001	채널2(2번센서)변위값	Read	
0002	채널3(3번센서)변위값	Read	
0003	채널4(4번센서)변위값	Read	
0004	채널5(5번센서)변위값	Read	
0005	채널6(6번센서)변위값	Read	
0006	센서 구동 전압	Read	회로동작 시험용
0007	참고치 저장관련 Mark	Write	참고치 저장 명령용

Station은 측정된 데이터를 Modbus 메시지 구조에 맞게 변환한 후 RS-485 네트워크를 통하여 호스트 컴퓨터로 전송한다. 표1은 Station에 할당된 변수 주소를 나타내고 있으며, 변수 주소표는 호스트 컴퓨터에서 데이터를 요구할 때 참조된다.

#### 4. 종합관리 소프트웨어 설계

##### 4.1 사용자 인터페이스

호스트 컴퓨터는 RS-485 버스에 연결되어 있는 Intelligent Sensing Head에 센서 데이터를 요구하고

## 다중 노드 네트워크를 이용한 내공변위 계측 시스템

수신된 데이터를 관리하여 사용자가 변위센서의 정보를 쉽게 얻을 수 있도록 설계하였다. 그림9는 종합관리 소프트웨어의 구성을 나타내고 있으며, Visual Basic을 이용하여 구현하였다.

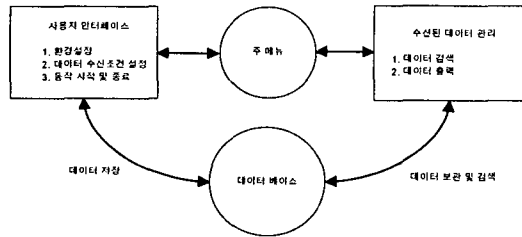


그림 9. 종합관리 소프트웨어의 구성  
Fig. 9. Integrated management software scheme

종합관리 소프트웨어는 계측장소에 설치된 하드웨어의 정보를 이용하여 Intelligent Sensing Head에 데이터를 요구하고 수신된 데이터를 관리하므로 사용자가 하드웨어 정보를 입력할 수 있는 기능이 필요하며, 데이터 수집의 자동화를 위하여 예약된 시간에 자동으로 데이터 수집을 시작하고 다시 예약된 시간에 데이터 수집을 종료하는 기능과 수신한 데이터의 개수로 수집을 종료하는 기능들이 요구되며 그림10과 같이 주메뉴에 위의 기능을 구현하였다.

환경설정 메뉴를 이용하여 설치된 하드웨어의 구성을 설정하며, 각 Intelligent Sensing Head의 변위 데이터를 예약된 시간에 수집하거나 정해진 개수만큼의 데이터를 수집할 수 있도록 설계하였다.

그림10과 같이 버튼과 툴바를 이용하여 사용자가 쉽게 메뉴를 사용할 수 있도록 구성하였으며, 데이터

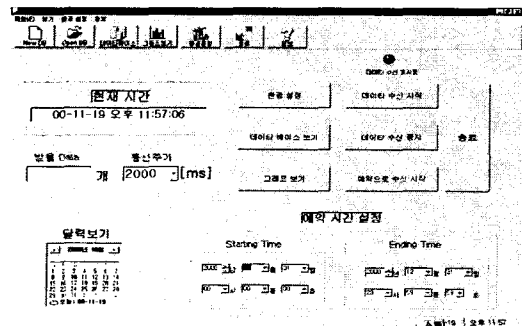


그림 10. 주 메뉴  
Fig. 10. Main menu

그림 11. 데이터베이스 보기  
Fig. 11. Database data display

를 수집할 때 예약된 시간에 시작되고 종료될 수 있으며, 사용자가 정해놓은 개수의 데이터가 수신되면 종료될 수 있도록 하여 계측이 자동적으로 이루어지도록 하였다. 또한, 수집된 데이터를 관리하기 위하여 데이터베이스를 사용하여 편리성과 신뢰성을 향상시켰다. 그림11은 데이터베이스에 저장된 데이터의 출력화면이다.

## 4.2 변위보정

터널의 내공변위는 다중-포텐시오메터형 변위센서에 의하여 전기적 신호로 변환되며, 다시 Intelligent Sensing Head에 의하여 디지털 값으로 바뀐 후 호스트 컴퓨터로 전송된다. 그러므로 호스트 컴퓨터에서는 수신된 디지털값을 이용하여 변위를 측정한다. 그러나 일반적으로 다중-포텐시오메터형 변위센서의 변위에 대한 전압의 비는 완벽한 선형관계가 아니며, 또한, 환경적인 원인으로 인하여 A/D 변환기의 기준 전위가 바뀌면 측정된 변위값의 신뢰성이 떨어진다. 그러므로 호스트 컴퓨터에서는 수신된 값을 변위값으로 변환할 때 보정을 해주어야 한다. 설계된 시스템에서는 Look-Up 테이블을 이용하여 변위센서의 비선형성을 보정하였으며, A/D 변환기의 기준전위를 변위와 함께 측정하여 환경적인 요인으로 인하여 생기는 전압의 불안정에 의한 보정을 하였다. 그림12는 변위센서의 보정을 위한 Look-Up 테이블을 나타내고 있으며 모든 센서의 특성을 입력할 수 있도록 하였다. 호스트 컴퓨터에서 변위센서의 선형성을 보정하기 위하여 보정작업을 행함으로써 각 Intelligent

Sensing Head 마다 마이크로컨트롤러의 S/W가 달라져야 하는 문제와 마이크로컨트롤러의 메모리 부족을 해결할 수 있었으며, 변위센서가 교체되거나 노후되어 Look-Up 테이블의 내용을 바꾸어야될 필요성이 있을 때 호스트 컴퓨터에서 쉽게 바꿀 수 있도록 하였다.

Station	Channel	DATA VALUE
0.00	0.0000	0.05
0.05	0.0500	0.05
0.10	0.1001	0.10
0.15	0.1501	0.15
0.20	0.2002	0.20
0.25	0.2502	0.25
0.30	0.3003	0.30
0.35	0.3503	0.35
0.40	0.4004	0.40
0.45	0.4504	0.45
0.50	0.5005	0.50
0.55	0.5505	0.55
0.60	0.6006	0.60
0.65	0.6506	0.65
0.70	0.7007	0.70
0.75	0.7507	0.75
0.80	0.8008	0.80
0.85	0.8508	0.85
0.90	0.9009	0.90
0.95	0.9509	0.95
1.00	1.0010	1.00

그림 12. 변위센서의 Look-Up 테이블  
Fig. 12. Look-Up table of displacement sensors

### 4.3 데이터 관리

종합관리 소프트웨어에 수집된 변위정보는 데이터 베이스에 저장되며, 저장된 변위 데이터를 Intelligent Sensing Head의 주소에 의하여 또는 데이터가 계측된 시간에 의하여 검색할 수 있도록 하였으며, 변위 차이값 보기, 임계값 차이 이상만 보기 기능을 만들어 검색된 데이터들중 현재 데이터와 바로 전 데이터간의 차를 표시하거나 사용자가 입력한 임계값 이상의 데이터만을 검색할 수 있도록 설계하였다.

## 5. 실험 및 고찰

제작된 시제품을 그림13과 같이 2개의 Intelligent Sensing Head와 각각 3개의 변위센서를 이용하여 구성된 후 터널에 설치하고, Sampling Time을 1초로 설정하여 25분 동안 연속 측정된 데이터를 그림14와 그림15에 그래프로 나타내었다.

1번 Intelligent Sensing Head의 변위센서 출력의 신뢰도를 높이기 위하여 A/D 변환기의 기준전압을 측정된 변위값과 함께 표시하였으며 그래프에 의하면 전자적으로는 안정된 상태에서 측정이 이루어진 것임을 알 수 있다.

절대 변위를 나타낸 그래프를 통하여 최초 설치된

후 포텐시오메터형 변위센서의 슬라이더가 4[cm] 근처에 있다는 것을 알 수 있으며 4[cm]를 기준으로 나타나는 변위를 확인할 수 있다.

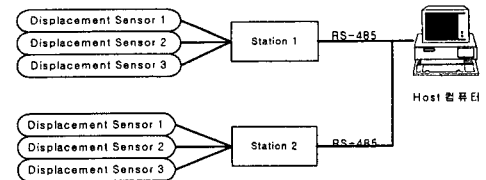


그림 13. 실험환경 구성도  
Fig. 13. Experimental setup

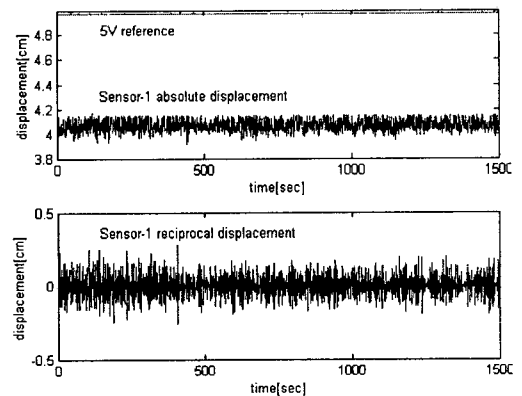


그림 14. 센서1의 내공변위  
Fig. 14. Inner section displacement of sensor 1

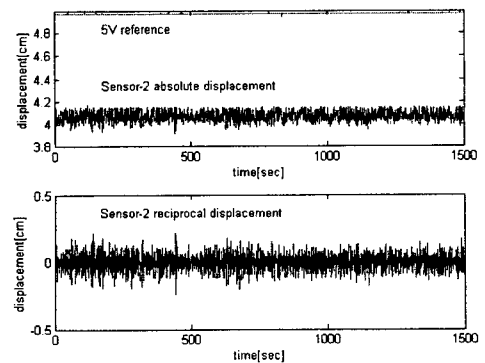


그림 15. 센서2의 내공변위  
Fig. 15. Inner section displacement of sensor 2

상대 변위 그래프는 이전의 데이터와 현재 데이터와의 차를 표시한 것으로 실제로 움직인 변위를 나타낸 것이다. 절대 변위와 상대 변위를 이용하여 내공변위의 변화 정도를 쉽게 관찰할 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 선형성 및 경시변화에 강한 포텐시오미터형의 변위센서와 마이크로컨트롤러에 의한 Intelligent Sensing Head 및 이들을 관리하기 위한 호스트 컴퓨터를 비동기 통신에 의한 다중 노드 버스에 의하여 네트워크가 구축된 Intelligent Multi-Rod Extensometer를 설계하였다. 또한, RS-485 다중 노드 네트워크의 안정된 동작을 위하여 Daisy-Chain 형태로 네트워크를 구성하였으며 Modbus 프로토콜을 사용하여 범용성이 높은 종합관리 시스템을 구축하였다.

Intelligent Sensing Head는 다중-포텐시오미터형 변위센서를 설계하여 사용함으로써 소형, 경량화가 가능하고 측정범위를 확대할 수 있었다.

호스트 컴퓨터의 종합관리 소프트웨어에 수집된 데이터는 비선형성을 보정하기 위하여 Look-Up 테이블 형식의 변위보정 알고리즘을 내장하였으며 측정환경 변화의 영향을 최소화 할 수 있도록 A/D 변환기의 기준전위를 변위값과 함께 측정하였다. 또한, 종합 관리 소프트웨어는 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 사용자 인터페이스를 설계하였으며, 수집된 데이터를 효율적으로 관리할 수 있도록 데이터베이스를 사용하였고 검색기능, 사용자가 설정한 임계값 이상의 값만을 표시하는 기능, 그리고 이전 데이터와의 차 값을 표시하는 기능을 갖추고있다. 설계된 시스템은 공사현장에 설치되어 측정의 항시성과 신뢰성 및 편리함을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] 백수현, 센서 핸드북, 도서출판 세화, 1990.
- [2] John B. Peatman, Design with Microcontrollers, 1989, McGraw-Hill.
- [3] John Goldie, "Ten Ways to Bulletproof RS-485 Interfaces", National Semiconductor Application Note 1057, October 1996.
- [4] John Goldie, "FAILSAFE Biasing of Differential Buses", National Semiconductor Application Note 847, July 1992.
- [5] [http : //www.modicon.com/techpubs](http://www.modicon.com/techpubs)

## ◇ 저자소개 ◇

서 석 훈 (徐碩薰)

1967년 9월 22일생. 1990년 단국대학교 전자공학과 졸업. 1992년 단국대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자공학과 박사과정.

우 광 준 (禹廣俊)

1946년 11월 8일생. 1974년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1977년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1980년 스트라스브르대 전자제어공학 DEA. 1983년 국립그르노블공과대 제어계측공학 박사. 현재 단국대학교 전자공학과 교수.