2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

하나로 유동모의 설비의 제어 기술 개발

Development of Control Techniques for HANARO Flow Simulation Test Facility

최영산, 김영기, 김민진, 박용철, 박주문

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

연구용 원자로인 하나로 노심에서는 각종 연구의 목적으로 여러 가지 측정 장치를 장전하여 조사 시험을 해오고 있다. 노심 내의 유동 특성으로 인해 조사 시험에 사용되는 측정 장비는 구조적 건전성이 사전에 확보될 필요가 있다. 현재 제작된 유동모의 설비는 실제 하나로 노심 크기의 1/2로 설계되었고 하나로의 유동특성을 모의하도록 제작되었으며 이를 이용하여 하나로에서 사용될 측정 장치들의 구조적 건전성 및 성능 등을 검증한 후 실제 노심에 장전하여 조사 시험을 수행한다. 현장으로부터의 각종 신호들이 입력되는 시험 장치는 PLC, 주제어반 및 Data 기록장치로 구성되어 있다. PLC는 정해진 제어논리에 의해 현장 기기를 제어하고 주제어반에는 현장으로부터의 각종 변수 및 동작상황을 일목요연하게 표시할 수 있는 지시계와 경보 및 정지가 발생할 경우 음성신호와 함께 경보를 알려주는 Annunciator 가 포함되어 있다. 또한 Data 기록장치는 시험 중의 각종 변수를 Graphic으로 표시하거나 저장할 수 있고 설정치 등을 변경할 수 있도록 구성되어 있다.

Abstract

Irradiation tests have been performed in the core of HANARO, the research reactor, for the purpose of various research. Due to the flow induced vibration in the reactor core, the test and measurement devices to be used for the irradiation test need the verification of structural integrity. The newly built flow simulation test facility is designed to be 1/2 size of the real HANARO core and to simulate the characteristics of the reactor coolant flow. By using this facility, we verify the structural integrity and performance of the test and measurement devices to be used in HANARO and carry out

the irradiation test after loading them into the reactor core. The simulation test facility to which the various input signals are fed from the field instrument area consists of PLC(Programmable Logic Controller), main control panel and data logging computer. PLC(Programmable Logic Controller) is controlling the field devices according to the predefined control logic. Main control panel contains the indicators that are clearly displaying the various parameters and operation status from the field and the annunciator that is generating the voice signal and alert when there is alarm or shutdown condition. The data logging computer can give graphic display of the various parameters in test, save them and adjust the set-point.

1.0 서론

연구용 원자로인 하나로는 1995년 2월에 초임계에 도달한 이후 현재 정상적으로 가동되고 있으므로 하나로 노심에 실험장치를 장전하여 많은 실험들을 수행하고 있다. 이 실험들을 수행하는 과정에서 실험장치들을 하나로에 장전하기 전에 하나로와 동일한 유동특성을 가지고, 방사선의 피폭 위험이 없는 노외시험장치에서 구조적 건전성을 입증하고 성능을 예측한 후에 하나로에 장전하면 더 안전하게 실험할 수 있다. 이를 위해 하나로 노심의 1/2로 구성하여 하나로의 정상 유량 및 유동 특성을 모의하기 위한 하나로 유동모의 설비를 만들게 되었다.

이 설비는 1/2 노심 구조물 집합체 및 유체순환계통 및 보조계통을 포함한 유체순환장치로 구성된다. 1/2 노심 구조물 집합체는 핵연료 대신에 유동모의 오리피스가 장전되어 방사선 피폭의 위험 없이 하나로와 동일한 유동특성을 모의할 수 있다. 유체순환장치는 각 유동관에 설계유량을 공급하고, 하나로와 동일한 유체온도를 유지한다.

하나로와 유동모의 설비를 안전하게 운전하기 위한 계측제어설비는 PLC를 중심으로 Annunciator와 Mimic board를 포함하는 주 제어반, 실험 중 모든 Data를 기록 및 저장하는 Data 기록 장치 그리고 전원 공급장치 등으로 구성하였다. PCL는 현장의 각종 계측기 및 신호 전송기들로부터 신호를 받아 제어논리에 따라 현장 계측기들을 제어하기 위해 출력신호를 보낸다. Data 기록장치에도 실시간으로 Data를 전송하면 이 기록장치는 자료를 저장하고, 표나 그림으로 자료출력이 가능하다. 그리고 Mimic 보드와 Annunciator에 현재의 운전상황과 각종 경보를 신호를 보내어 시각적으로나 청각적으로 운전원에게 현재의 상황을 전달한다. 본 논문에서는 하나로 유동모의설비를 운전하기 위한 주제어반 데이터 기록장치를 포함한 제어 논리 개발 과정 및 현장성능시험을 통해 제어논리 검증에 대해 기술하였다

2.0 유체순환장치 구성 및 계측기기

2.1 유체순환장치의 구성

유체순환장치는 유체순환계통과 보조순환계통, 두 계통을 제어할 수 있는 주제어반,

Data 기록장치 등으로 구성된다. 유체순환계통은 순환펌프(P-01)와 1/2 노심 구조물 집합체의 출구관, 유입관 및 노심 우회유량 유입관으로 구성된다. 출구관은 순환펌프의 흡입관으로 총 유량을 이송하며 순환유체의 출구 온도 감지기(TE-01), 스트레이너(YS-01), 순환펌프 입구밸브(HCV-01) 및 흡입 압력계(PI-02)가 설치되어있다. 유입관은 펌프의 송출관으로 총 유량이 흐르며 체크밸브(V01), 송출밸브(HCV-02) 및 송출압력계(PI-03)가 설치되었다. 이 관은 노심 우회유량을 이송하기 위해 분기되고 나머지는 노심 유량을 이송한다. 노심 유입관은 플레넘의 유입구 노즐과 연결되어 있으며 노심 유량계(FE-01), 압력 전송기(PT-01) 및 온도 감지기(TE-02)가 설치되어 유체순환계통의 주 제어반에 노심 유량, 온도 및 압력을 지시한다. 노심 우회유량 유입관의 우회유량은 조절밸브(HV-01)의 개도에 따라 조절이 가능하며 4 인치 노심 우회관을 따라 이송되어 침니 상부 6 인치 유입구로 유입된다. 침니에 유입되기 전에 노심 우회유량의 10 %가 보조계통을 지나면서 순환유체를 정화하고, 온도를 조절하여 다시 노심 우회관으로 유입된다. 노심 우회관에는 노심 우회유량계(FE-02)가 설치되어 있어 합쳐진 노심 우회유량을 측정한다. **[1]**

보조순환계통은 정화유량이 우회유량 유입관에 유입되어 정화펌프 (P-01)에 의해 여과기를 거치면서 순환유체의 불순물이 제거되고, 온수기(EH-01)나 열교환기(HX-01)를 거치면서 노심의 출구온도에 따라 순환유체가 냉각되거나 가열된 후 다시 노심 우회관으로 송출된다. 그리고, 이 장치는 동파방지를 위해 노심 구조물 집합체의 출구온도 신호에 따라 순환장치 내의 유체를 가열하여 순환시킨다.

주제어반은 PLC와 Annunciator로 구성된다. PCL는 현장의 신호 전송기 및 각종 계측기들로부터 신호를 전달받는다. 입력된 신호들은 PLC에 구성된 논리도에 따라 조합되고 현장계측기 제어 및 주제어반 표시를 위해 다시 주제어반으로 보내진다. 또한 Data 기록장치에게 실시간으로 Data를 전송하는 기능을 한다. 주제어반은 각종 Pump, Fan, Heater 들의 기동 및 고장상태, 주요 배관 상에 유량 및 압력값 등을 PLC 로부터 전송 받아 지시한다. 경보 및 정지 설정변수로 설정된 신호들은 실측값이 설정치 등을 초과할 경우 Annunciator에서 별도로 경보 상황을 음성 신호와 함께 발생하게 하는 기능을 갖도록 하였다. **[2]**

Data 기록장치는 시험로에서 시험 중의 각종 신호들을 선택적으로 PLC 로부터 전송 받아 저장 및 Graphic으로 표시가 가능하고, 사용자가 경보 설정치 등을 변경할 수 있으며 이 설정값 들은 다시 PLC에 저장하도록 하는 기능을 한다. 또한 경보 설정치를 초과한 변수들에 대해서는 별도의 발생 및 종료시간이 포함된 alarm log가 되도록 설계하였다. 전체적인 구성은 그림 1과 같다.

2.2 계측기기의 신호 특성

모의유동 시험장치의 배관 상에는 총 8 종에 약 22개의 계측기기들이 설치되어있으며 아래의 표 1과 같다.

온도감지기는 노심의 입구 및 출구 온도, 정화유량의 온도 측정용으로 4 sets 가 사용되

었다. 배관에 Dailled Bar Type(1/2″ NPT)의 Thermowell을 설치했으며, 정밀측정을 위해 안정성과 재현성이 뛰어난 RTD Pt 100Ω, 4- Wire 쎈서를 사용했다. 온도 측정 범위는 0 - 100 ℃ 이고 배관에서 측정된 온도 저항값은 PLC로 입력되고, PLC의 변환기(Converter)를 거쳐 0 - 100 ℃ 에 해당하는 4 - 20 mA의 전류값으로 변환된 뒤 주 제어반의 지시기에서 이 전류신호를 ℃ 단위로 지시한다.

종 류	용 도	수 량(set)	기 타
차압전송기	노심 유량 및 우회유량, 정화유량, 수위 전송	4	Smart Type(대한 Inst.)
온도감지기	노심 입,출구 및 정화유량	4	Pt 100Ω(우진 계기)
위치스위치	수조수 수위	1	Float Type(우진계기)
	수조수 수위	1	Float Type(우진계기)
MOV	우회유량 조절,	3	Gear Operated MOV (대한 Inst.)
압력지시계	배관 내 압력 지시 정화필터 차압스위치	7 1	Bourdon Tube(우진계기) Bellows(우진계기)
안전변	배관 과압시 압력 경감	2	

표 1. 배관 상에 설치된 계측기

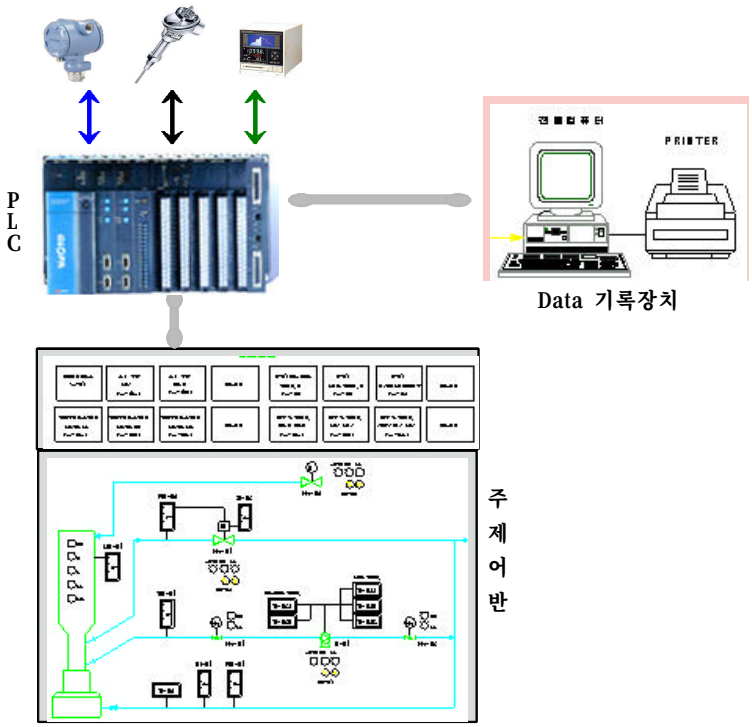

그림 1. 유체순환장치의 계측제어 구성

노심 유량 및 우회유량, 정화유량, 노심 수위 및 유입관의 압력전송을 목적으로 하는 차압전송기는 5 sets 가 사용되었다. 유량측정은 유체가 흐르는 배관에 수직으로 Pitot Tube를 설치하고 유체가 흐를 때 발생하는 차압 신호를 S.S.-Tube를 통해 차압전송기로 전송한다. 전송기는 입력된 차압신호를 배관의 총 유량에 비례하는 전류신호로 변환하고 주 제어반의 지시기에서 이 전류신호를 받아 kg/sec 단위로 유량을 지시하도록 구성하였다. 수위측정은 노심에 채워지는 냉각수의 높이에 따라 형성되는 대기압과의 차압을 차압전송기로 전송한다. 입력된 차압신호를 시험로(chimney)의 총 수위에 비례하는 전류신호로 변환하고 주 제어반의 지시기에서 이 전류신호를 받아 수위를 % 단위로 지시하도록 구성하였다. 차압전송기의 내부구조는 그림 2.과 같다.

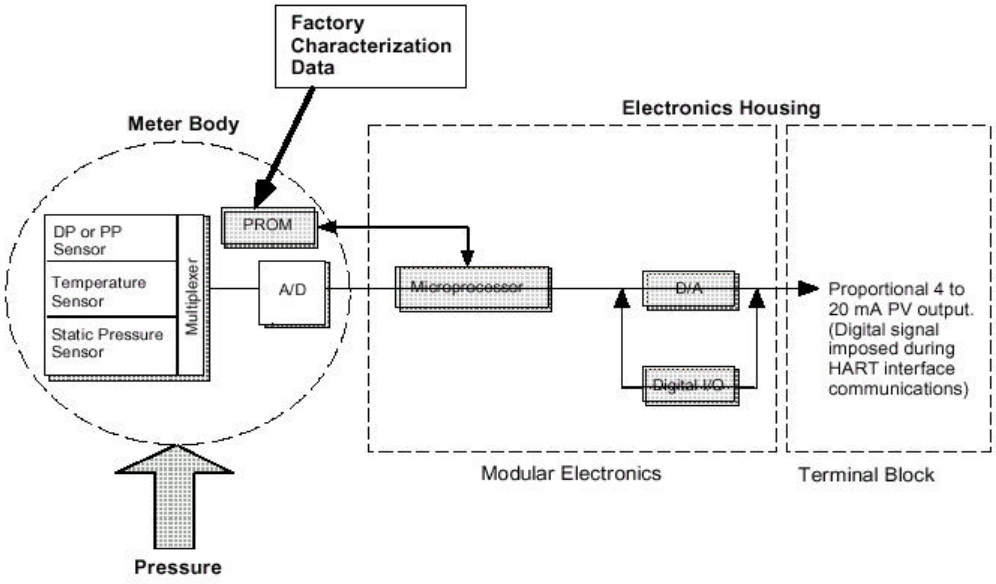

그림 2. 차압전송기의 내부구조

압력 계기류는 순환펌프, 정화펌프, 냉각펌프의 전단 흡입압력, 후단의 송출압력 측정용으로 2 sets 씩 6 sets 가 설치되어있고, 배관내의 이물질을 걸러주는 Y-Type Strainer 에 또 1 sets의 압력지시계가 설치되어있다. 순환펌프의 전단과 후단에는 압력의 변동이 심하여 압력지시계의 파손을 줄이기 위해 Fill-Fluid Type을 사용하였다. 정화필터의 수명을 알려주는 PDIS가 보조계통에 1 set 설치되었다. 중요한 노심에 압력은 압력 전송기의 신호를 이용해 주제어반상에서 지시하고 제어용 신호로 사용하도록 구성이 되어있다. 세부 사양은 표 2와 같다.

추가로, 노심의 우회관에 설치되어 우회유량을 조절을위한 목적으로 전동벨브가 사용되었다. 주제어반에서는 수동으로 개도 미세 조절이 가능하도록 구성하였고, 움직인 개도는 가변저항 형식의 포탠시오미터의 회전에 의해 다시 4 - 20 mA 의 전류가 출력되어 주제어반에 % 단위로 개도를 표시하도록 하였다. 정상 가동시에 배관의 막힘 등으로 인한 압력 상

승시 압력 경감을 위해 안전변(PSV) 가 2 sets 사용되었다.

항 목	압력지시계	차압스위치
정밀도	±1.0% F.S	±1.5% F.S
형식	C 형 버든관	Bellows
칫수	100 mm	150 mm
측정범위	0 ~ 600 Kpa	0 ~ 600 Kpa
연결부	1/2“ NPT	1/2“ NPT
동작 온도	-40 ℃ ~ +60 ℃	-20 ℃ ~ +80 ℃

표 2. 압력계기류의 특징

3.0 PLC 와 Data 기록장치

3.1 S/W 및 H/W의 특성 및 구성

Data 기록장치의 구현은 모의유동설비의 시스템 특성을 포함하여, 신호의 특성과 노이즈에 영향을 고려한 신호의 연결 방식, 신호의 특성과 시스템에 요구되는 응답시간을 고려한 Sampling 주기, 입력신호가 정해진 정확도의 범위 내로 안정화되는데 걸리는 시간인 신호의 안정화 시간 등과 같은 일반적인 사항을 고려하여 설계하였다.

MMI는 Borland사의 C++ Builder를 사용하여 구현하였다. C++ Builder는 MMI 화면의 개발이 용이하고, 선정된 하드웨어를 지원한다. 또한 그래픽 도구를 포함하며, 시스템의 운전상태를 표시하거나, 복잡한 애니메이션을 구성하는 것과 같은 MMI를 지원하고 사용자의 입력을 받아서 적절한 응용동작을 수행하는 기능을 한다.

입출력 신호시스템은 산업용으로 널리 쓰이는 PLC를 사용하였고 현장에 열악한 환경조건을 고려하여 온도, 습도 전기적 노이즈에 강하도록 설계했으며, 아날로그입력(AI) 모듈, 아날로그출력(AO) 모듈, 릴레이 입력(Relay Input) 모듈 등으로 입출력 하드웨어를 구성하였다.

PLC는 컴퓨터제어시스템과 유사하나, 프로그램을 작성하는 방법과 프로그램이 수행되는 방법에 있어서 특이한 점을 갖고 있다. 프로그램은 주로 ROM에 저장되며, 수행방식은 정해진 주기와 시퀀스에 따라서 수행된다. 즉 연속적인 루프 형태로 응용프로그램을 순차적으로 수행하며 모든 입력을 읽고 난 후 응용프로그램을 수행하고, 출력을 내보내는 연속적인 동작을 수행한다.

Data기록장치는 컴퓨터의 대용량 기록매체를 이용해서 사용자가 편리하게 연구 할 수 있고 다양한 환경을 제공하도록 제작하였다. PLC에서 수집되는 현장으로부터의 여러 가지 신호 데이터들을 0.5초 - 20초 사이를 0.5초(기본값) 간격으로 저장 주기를 지정 할 수 있고, 실시간 모니터링, Print 및 File 전송이 가능하도록 MMI 화면을 구성하였다.

측정된 값들은 실제 설치현장과 유사한 그래픽화면상에 시간에 따른 추이를 저장 초기값부터 게이지 및 램프방식으로 측정된 값들이 실시간으로 표시되며, 한눈에 전체시스템 상태를 파악할 수 있도록 구현하였다. 실험이 끝난 후에도 "측정 및 저장 포인트 리스트"의 모든 저장된 값을 다양하게 분석하기 위해 다음과 같이 세 가지 방법으로 출력을 할 수 있도록 하였다. 첫째는, 각 채널별로 시간에 따른 그래프를 프린터로 출력이 가능하게 하며, 별도의 그림파일로 저장 가능한 그래프 방식이다. 둘째는, 모든 값들을 테이블방식(가로열:채널별, 세로열:시간별)으로 표시하고, 프린터로 출력 가능토록 한 테이블 방식이다. 셋째는 측정 기록된 값들에 대해 엑셀이나 테크플럿등의 외부프로그램에서 Import하여 사용할 수 있도록 Text방식의 CSV파일을 만들어 출력하는 텍스트 방식이 있다.

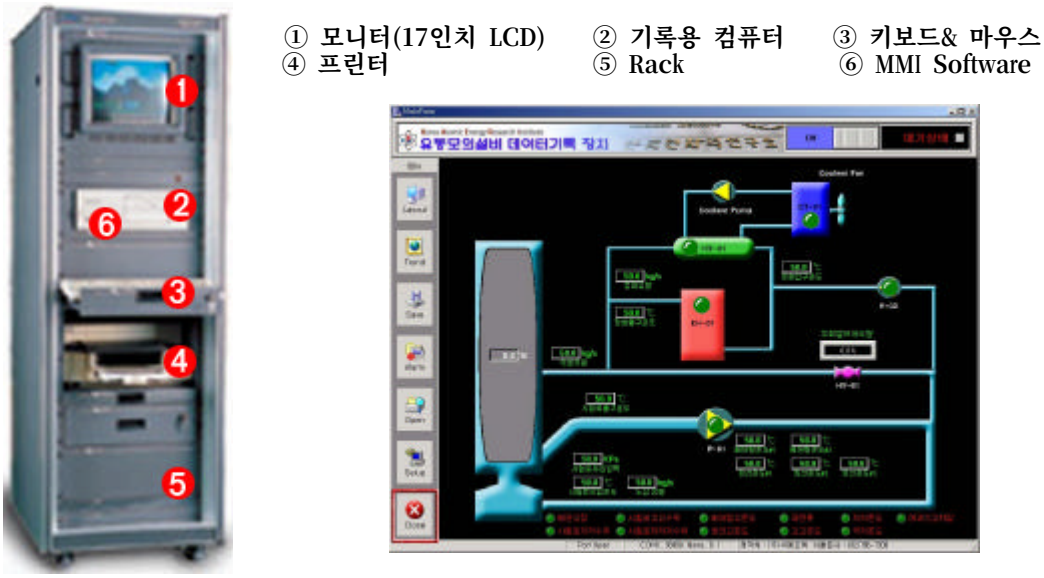

그림 3. Data 기록장치의 구성과 MMI 초기화면

만약, 운전 중 PLC상에서 경보가 발생한 경우도, 데이터기록장치에서 경보신호를 체크하여 모니터 상에 표시 및 저장해준다. 경보의 저장은 발생 및 종료 시간을 함께 기록하고 Log File 을 Text방식으로 저장하여 실험이 끝난 후 View 및 Print 출력 할 수 있도록 하였다. 또한 다양한 실험조건에 적용시키기 위해 PLC의 각종 설정값들을 프로그램 상으로 변경할 수 있도록 제작하였고 운전 중에라도 저장된 과거의 실험 데이터들을 분석할 수 도 있게 설계하였다.

UPS는 시험 중 유동모의설비에서 주 전원이 차단될 경우 Data를 보존하기 위하여 최대 30분까지 전원을 공급할 수 있도록 설치하였다. MMI 초기 화면과 전체적인 하드웨어의 구성은 그림 3와 같고 Data 기록장치의 주요 하드웨어는 아래와 같다.

◑ 모니터 : 현장에서 계측되는 다양한 신호 및 정보들을 모니터를 통해서 확인할 수 있는 장치이고 17″ LCD Monitor 로 구성하였다.

◑ 기록용 컴퓨터 : 중앙연산처리장치(CPU)가 내장되어 있는 실질적인 연산을 수행하는 장치로서 세부사양은 아래와 같다.

◇ 속 도 : Intel Pentium 4 - 2.0GHz
◇ 용 량 : 512MB DDRAM
◇ HDD : 40GB HDD 7200RPM
◇ FDD : 3.5″ FDD,
◇ 기 타 : CD-RW 40X/23X/10X
NIC : 10/100 Lan Card

◑ MMI Software : 원자력연구소 하나로 유동모의 순환장치의의 실험을 위한 전용 소프트웨어이다. PLC로 계측되는 신호를 받아들여 기록, 저장 및 출력하는 기능을 한다.

◇ MMI Software : c++ Builder(Borland)

◑ UPS : 유체 순환장치에서 시험중 주 전원이 차단될 경우를 대비해서 설치하였다. 실험중인 Data를 보존하기 위함이 주목적으로 사용하였다. 세부 사양은 아래와 같다.

◇ 출력용량 : 750VA, 450Watt
◇ 용량에 따른 백업 TIME (P750K) : Min 20M, Max 30M

3.2 현장계측기 및 Data 기록장치 검증 시험

2002년 12월부터 약 4개월에 걸쳐서 현장 계측기 설치 및 현장 시험을 수행했고 Data 기록장치와 병행하여 전체적인 성능시험을 실시하였다.

현장 계측기 설치 시에는, 현장 시험과 병행하여 각 현장 계측기에 대해서 교정 및 성능을 점검하였다. 현장 설치 전, 각 교정계측장비에 대해 국가공인기관의 검교정을 거친 후 현장계기를 교정하였고 계기의 오차 범위 내에서 동작하고있음을 확인하였다.

유량 및 압력 관련 차압전송기는 ±0.25%F.S.의 계기오차를 갖는 smart type 전송기를 동일하게 사용하였다. 계기의 선형성과 편차를 정확하게 확인하기 위해서, 입력값을 10구간으로 나누어 인가하였고 그때의 출력값인 전류를 측정하여 정리하였다. 표 3 및 그림 4에서 보면, 각 계기의 교정 오차는 입력값에 대해서 최대 -0.1%, -0.05%, 0.0%, 0.0% 로 계기오차를 충분히 만족시키고있으며 선형성도 매우 우수하고 안정된 출력을 제공하는 것을 확인할 수 있었다.

온도관련 현장 계기는, 현장의 특성을 고려하여 기타 온도 sensor에 비해 신호의 선형성과 재현성이 좋고 온도편차가 거의 없으며 안정된 출력을 제공하는 pt 100Ω 4-선식 RTD를 사용하였다. 교정 방법은, 실제 사용 온도 범위인 0℃ ~ 50℃ 의 5 구간을 나누어 입력을 인가하고 그때마다의 저항값을 측정하여 다시 온도로 환산하였다. 표 4와 그림 5에서 보면 RTD 교정오차가 최대 0.33℃, 0.2℃ 로 ±0.5℃를 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다. 현장에 RTD 대신 저항신호발생기를 연결하여 주제어반에서 지시기와의 오차 확인도 병행하여 수행하였다.

표준압력 (mmH2O)	표준출력 (mA)	노심유량계(mA)		정화유량계(mA)		수위전송기(mA)		압력전송기(mA)	
		측정값	오차	측정값	오차	측정값	오차	측정값	오차
0	4	4	0	4.00	0	4	0	4	0
250	5.6	5.59	-0.01	5.6	0	5.6	0	5.60	0
500	7.2	7.19	-0.01	7.2	0	7.2	0	7.20	0
750	8.8	8.79	-0.01	8.8	0	8.8	0	8.80	0
1000	10.4	10.39	-0.01	10.4	0	10.4	0	10.46	0.06
1250	12	11.99	-0.01	11.99	-0.01	12.00	0	12.00	0
1500	13.6	13.59	-0.01	13.59	-0.01	13.60	0	13.60	0
1750	15.2	15.18	-0.02	15.19	-0.01	15.20	0	15.20	0
2000	16.8	16.78	-0.02	16.79	-0.02	16.80	0	16.80	0
2250	18.4	18.38	-0.02	18.39	-0.01	18.40	0	18.40	0
2500	20	19.98	-0.02	19.99	-0.01	20.00	0	20.00	0

표 3. 차압전송기 교정 결과

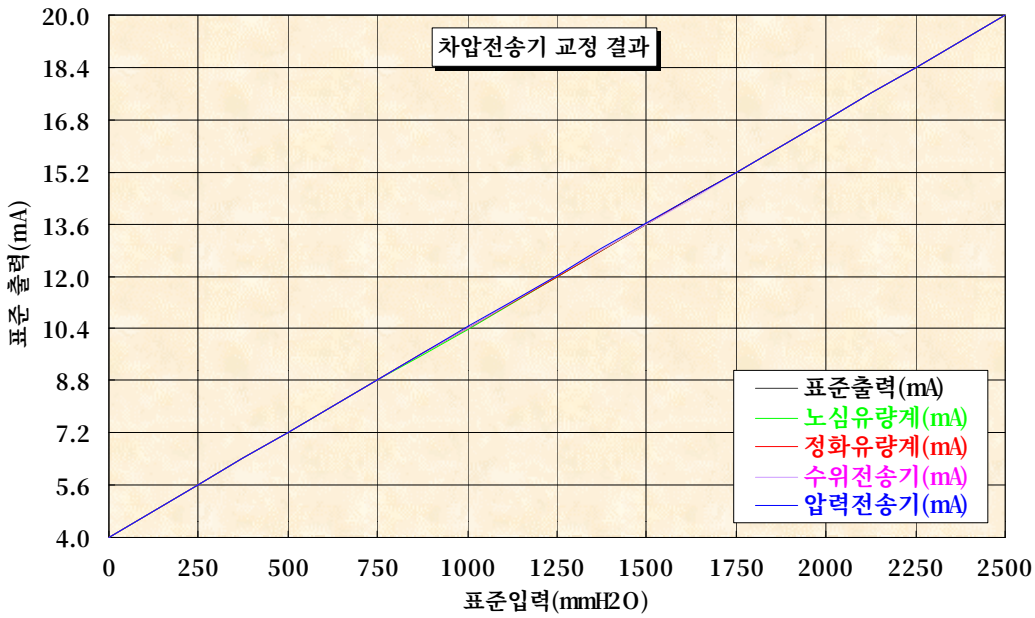

그림 4. 차압전송기의 신호 특성

표준저항값(Ω)	표준온도(℃)	노심출구온도계		노심입구온도계	
		측정값	오차	측정값	오차
100	0	0.12	0.12	-0.05	-0.05
103.9	10	10.05	0.05	9.97	-0.03
107.79	20	20.13	0.13	20.01	0.01
111.67	30	30.27	0.27	30.12	0.12
115.54	40	40.23	0.33	40.08	0.08
119.4	50	50.19	0.19	50.2	0.2

표 4. RTD 교정 결과

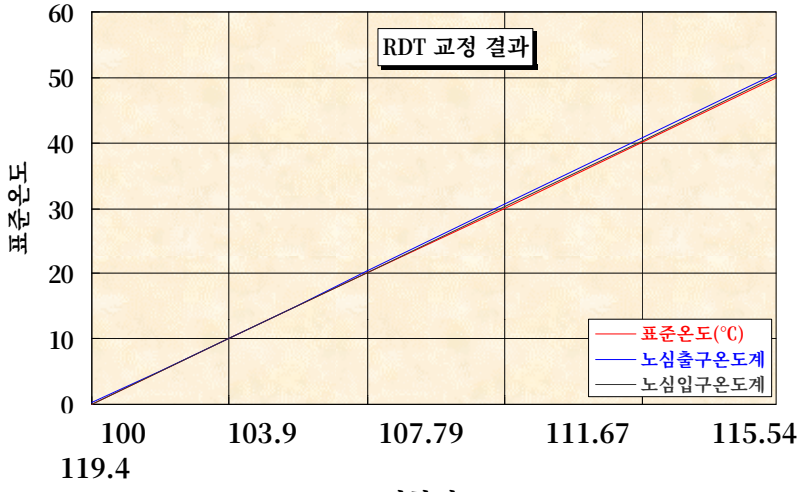

그림 5. RTD의 신호 특성

현장계기의 교정이 완료된 후, 계통을 정상으로 가동하면서 Data 기록장치와의 종합적인 성능시험을 실시하였다. 우선 유동모의설비의 각 구성품에 대해 전원 상태와 정상 가동상태를 확인하고, 각 벨브들의 정렬상태도 확인하였다. Data 기록장치는 각 현장 계측기로부터의 신호선 연결 및 신호 건전 상태를 확인하였다.

유량관련 신호에 대해서는, 비교 및 검증 차원에서 기존에 보유하고있던 초음파유량계와 병렬로 설치하여 비교시험을 실시하였다. 초음파유량계와 센서를 국가검교정기관에 교정을 실시한 후 현장 유량계가 설치된 3곳에 병렬로 초음파 센서를 설치하고 대상계기와 유량값을 비교하였다. 나머지 현장으로부터의 온도, 압력 및 각종 접점 신호들은 Data 기록장치로 전송 받아 기록하였고, 각종 제어와 관련된 제어 논리시험도 정상적으로 수행할 수 있었다. 전체적인 Data 기록장치에서의 신호 특성은 그림 6과 같다.

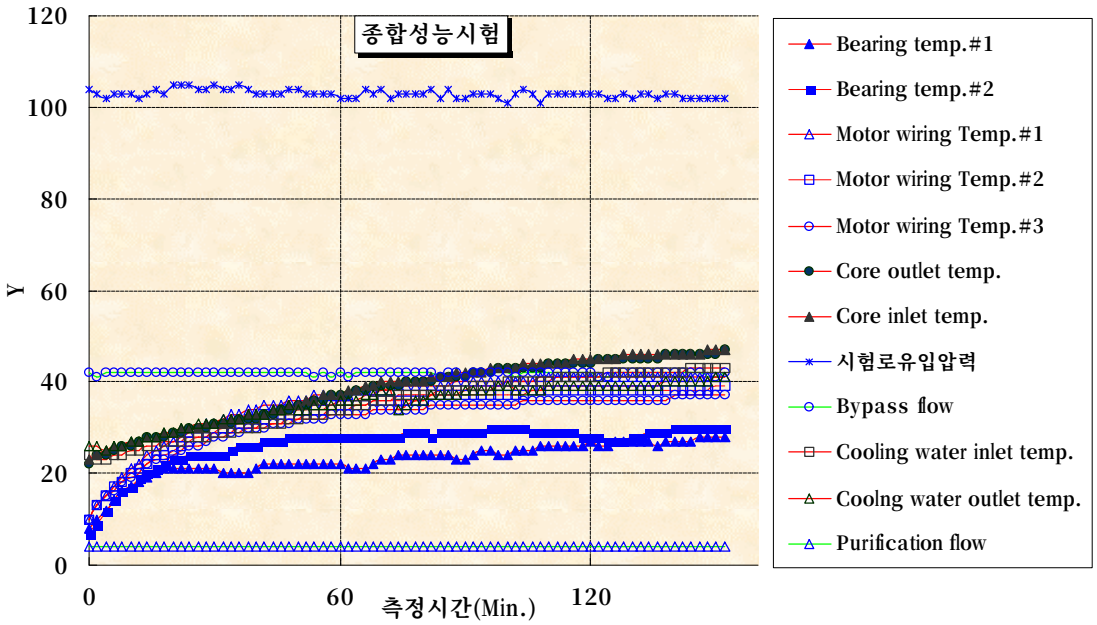

그림 6. 정상운전중 Data 기록장치의 신호 특성

4.0 결론

하나로 모의 유동 시험장치는, 이용자들이 하나로 노심에서 수행할 각종 시험 장치를 미리 유체순환장치에 장전하여, 구조적 건전성 및 계측 성능 등을 사전에 검증하는 것이 주목적이다. 하나로와 같은 유동 특성을 만들기 위하여, 계통의 모든 특성이 하나로와 유사하게 제작하였다. 실제 성능시험에서 PCL는 현장으로부터 각종 신호를 전달받고 구성된 논리도에 따라 현장 계측기들을 제어하기 위해 출력신호를 정상적으로 출력하였다. 또한, Data 기록장치는 선택적으로 PLC 로부터 신호를 전송 받아 Graphic으로 표시가 가능하였다. 경보설정치 등은 사용자가 필요에 따라 변경할 수 있으며 이 설정값 들을 다시 PLC 로 저장할 수 있는 기능도 확인하였다. 종합적인 성능시험도 정상적으로 수행할 수 있었다.

이 장치를 이용해서, 실제 시험장치가 하나로에 설치되기 전에 구조적 건전성과 성능을 입증할 수 있고, 하나로의 이용을 활성화하기 위한 많은 시험들이 안전하게 수행될 수 있으리라 예상된다.

참고문헌

[1] 박용철, “하나로 유동모의설비의 유체순환계통 제작 시방”, 기술보고서, KAERI/TR-2290/2002, 2002. 11

[2] 박용철, 하나로 모의유동장치의 보조계통 제작 시방“, 기술보고서, KAERI/TR-2299/2002, 2002. 11