

## 고온고압 열수력 실험장치(VISTA)의 출력변동 동특성에 관한 실험적 연구

### Experimental Studies on Dynamic System Characteristics of the High Temperature/High Pressure Thermal-Hydraulic Test Facility (VISTA) for the Power Variation

최기용, 박현식, 조석, 박춘경, 이성재, 송철화, 정문기

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

SMART-P 발전소의 종합적인 열수력 거동을 모사하기 위하여 한국원자력연구소에서 제작된 고온고압 열수력 실험장치(VISTA)를 이용하여, 출력변동에 대한 동특성 검증 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 5%에서 85%까지의 출력변동에 따른 일·이차계통의 동특성을 고찰하기 위한 실험을 수행하였다. 일·이차계통의 각 열수력 기기들은 계통의 동특성을 모사하기 위하여 자체 개발된 PID 자동제어 로직을 사용하였으며, 출력변동은 기준출력 10%, 25%, 50%, 75%에서 각각 5%, 10% 증가된 출력으로 변동되었으며, 변동방법은 Step 및 Ramp 증가방법을 사용하였다. 실험을 통하여 고온고압 열수력 실험장치의 출력변동 요인에 대한 계통 동특성을 고찰하였으며, Step/Ramp 증감방법에 따른 효과는 거의 없는 것으로 밝혀졌다. 이차계통 주급수제어밸브 상류측의 경계조건이 응답특성에 크게 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 전 출력 범위에서 동일한 P, I, D 값을 사용하는 것보다 출력 및 운전 조건에 따라 변경하는 것이 적절한 제어임을 확인하였으며, 이에 대한 정량화 작업 및 각 열수력 변수들의 시상수(time constant) 대한 정량화 작업은 위해서는 향후 추가적인 실험적 연구가 요구된다.

#### Abstract

Dynamic system characteristics tests were carried out for the power variation by using the high temperature/high pressure thermal-hydraulic test facility, VISTA(Experimental Verification by Integral Simulation of Transient and Accidents), which had been constructed to simulate the SMART-P by KAERI. Experimental tests have been performed to investigate the thermal-hydraulic dynamic characteristics of the primary and the secondary systems in the range of 5% to 85% power. Automatic PID control logics were developed and installed to the VISTA facility to control the major thermal hydraulic parameters. Power was changed with either a step or a ramp changing method from the reference power of 10%, 25%, 50% and 75% to 5% or 10% higher power. It was found that there is no noticeable difference in the

responses between a step and a ramp changing method. When unique constants of P, I, and D were used in the range of 5% to 85% power, it was found to be liable to lose the system control. Further studies are required to quantify the controllability and the time constants of the major thermal hydraulic parameters.

## 1. 서론

고온고압 열수력 실험장치 VISTA[1, 2]는 SMART-P[3]를 기준원전으로 하며, 높이비 1/1, 면적비 1/96, 체적비 1/96로 축소된 열수력 종합효과 실험장치이며, 온도 및 압력은 SMART-P의 정상상태 및 과도사고 조건을 모의할 수 있도록 설계 제작되었다. SMART-P에 대한 자세한 기술 사양 및 설계 기준은 참고문헌 [3-5]에 자세히 나타나 있다.

본 연구에서는 고온 고압 열수력 실험장치를 이용하여 5%에서 85%까지의 출력변동에 따른 일·이차계통의 동특성을 고찰하였다. 고온 고압 열수력 실험장치에는 일·이차계통의 열수력 변수들을 운전원의 요구에 따라 제어하기 위한 자동제어계통이 설치되었다. 일차측에는 노심 가열봉 히터 출력 및 주냉각재펌프 회전속도를 제어하기 위한 자동제어계통이 구축되었으며, 이차측에는 주급수 유량, 주급수 온도, 주증기 압력을 제어하기 위한 자동제어 계통이 구축되었다. 이 외에 고온고압 열수력 실험장치를 기동·가열하고 정상상태로 유지하기 위한 보조계통에도 자동제어 계통이 구축되었다. 자동제어 계통을 구동하기 위한 자동제어 로직은 자체 개발한 PID 자동제어 로직을 사용하였다. 출력변동은 기준출력으로 설정한 출력값에서 Step 증가 또는 1%/sec의 출력증가율로 증가시키는 방법을 사용하였다. 기준 출력으로는 10%, 25%, 50%, 75%의 4가지 경우를 기준으로 했으며, 기준출력에서 5% 또는 10% 증가한 출력값으로 증가시키는 방법을 사용하였다. 본 실험의 목적은 출력증감발 운전을 통한 고온고압 열수력 실험장치의 동특성을 고찰하는 것이다. 출력증감발 변동 요인에 대한 계통의 동특성은 가열봉 히터의 출력, 일차측 압력, 일차측 노심 입구와 출구 온도, 이차측 급수 유량, 이차측 증기압력을 측정함으로써 관찰되었다.

## 2. 자동 제어 계통

### 2.1 자동 제어 계통의 구성

고온고압 열수력 실험장치를 이용하여 계통 동특성 실험을 수행하기 위해서는 열수력 변수들을 운전원의 요구에 따라 제어하기 위한 자동제어계통이 구축되어야 한다. 고온고압 열수력 실험장치의 제어 계통의 구성은 다음과 같이 하드웨어적 구성 요소, 이를 구동하고 통제하는 소프트웨어로 구성되어 있으며, 구체적인 설계내용은 참고문헌 [1]에 상세히 기술되어 있다.

- 제어계통 하드웨어적 구성요소

- (1) 주요 기기의 운전상태나 공정변수를 표시하는 컴퓨터(Displayer)
- (2) 제어 Desk
- (3) 주요 기기의 이상상태를 경보하는 경보창
- (4) 주요 기기를 수동/자동운전으로 전환하는 스위치
- (5) 히터, 펌프, 밸브 등을 자동제어하기 위해 제어신호를 발생시키는 제어 모듈
- (6) 구동 제어기

- 제어계통 소프트웨어적 구성요소
  - (1) 계측제어계통 구성 소프트웨어
  - (2) 구동 제어기와의 인터페이스 프로그램
  - (3) 운전원 지시용 MMI 소프트웨어
  - (4) 증기표 동적 연결 모듈

고온고압 열수력 실험장치에는 자동 제어 로직의 구현을 위해서 하드웨어적으로는 Allen-Bradley 사의 PLC-5 processor 제어기를 설치하였으며, 소프트웨어로는 RSLogix 5를 설치하였다. **그림 1**은 고온고압 열수력 실험장치의 계측제어계통 구성도를 보여주고 있다. 각종 계측기 및 현장기기에서 들어오는 신호들은 계측계통과 제어계통으로 분류되어 입력되며, 필요시 신호 격리기(signal isolator)를 통해 계측계통과 제어계통에 동시에 입력된다.

## 2.2 자동 제어 로직의 구성

고온고압 열수력 실험장치의 출력변동에 따른 일·이차계통의 열수력 동특성을 고찰하기 위해서 일·이차계통의 주요 기기들에 대하여 자동제어로직을 설치하였다. 자동제어 로직이 설치된 주요기기들은 가열봉 히터 그룹 1,2,3, 주냉각재 펌프(MCP), 주급수제어 밸브1, 2, 주증기압력 제어 밸브, 주급수공급탱크 히터, 보충수 펌프다. 각 자동제어 기기들의 공정변수, 설정값, 제어신호 등에 대해서 **표 1**에 정리되어 있다.

### 2.2.1 가열봉 (Group 1,2,3) 출력 제어

**그림 2**는 노심을 모사하는 가열봉 제어 로직의 구성도를 보여주고 있다. 가열봉의 전기출력은 SCR 제어기를 통해 이루어지며, SCR 제어기는 제어계통의 하드웨어적 구성요소인 PLC(Programmable Logic Controller)에 의해 제어된다. PLC에는 압력, 온도, 유량, 수위 등과 같은 열수력 변수들을 제어하기 위한 다음과 같은 PID 방정식이 내장되어 있다.

$$CV = K_p(E) + K_i \int_0^t (E) dt + K_d \frac{d(E)}{dt} + Bias \quad (1)$$

여기서

- CV : 출력제어신호 (Output Control Variable)
- $K_p$  : 비례상수 (Proportional Gain)
- $K_i$  : 적분상수 (Integral Gain)
- $K_d$  : 미분상수 (Derivative Gain)
- SP : 설정값 (Set Point)
- PV : 공정변수 or 측정값 (Process Variable)
- E : 오차 (PV-SP, or SP-PV)

Bias : Feed-forward or External bias

식 (1)에서 볼 수 있듯이 PID 방정식은 error(E)를 입력으로 사용하여 계산을 수행하며, 계산된 출력값, CV는 아날로그 출력신호로 변환되어 제어기기를 구동하게 된다. 운전원은 PLC 연계용 소프트웨어를 사용하여 PID 제어를 위한 공정변수, 설정값, 각종 상수값 등을 할당하여, 자동제어를 구현하게 된다.

**그림 2**에서 볼 수 있듯이 가열봉의 출력은 노심 출구온도를 이용하여 제어하게 된다. 계측기를 통해 측정된 노심 출구 온도를 공정변수(PV)로 하고, 운전원이 설정한 노심 출구온도를 설정값(SP)으로 하여 두 값의 차이(E)가 zero가 되도록 제어는 이루어진다. 그러나, 고온고압 열수력 실험장치의 가열봉은 3개의 그룹으로 구성되어 있으므로 PID 방정식의 출력신호인 CV를 3개의 가열봉 제어기로 분배할 필요가 있으며, 이것은 각 가열봉 제어기로 입력되는 신호에 가중값(weighting factor)을 곱하여 구현되었다. 만약, 가중값을 사용하지 않으면, 저출력일 경우에 그룹 3 가열봉의 큰 출력용량으로 인해 출력제어의 민감도가 떨어지게 되며, 제어범위를 벗어나게 된다. 그러므로 저출력일 경우에는  $FR1 > FR2 > FR3$ 의 순서로 가중값의 순위를 정하고, 고출력 운전할 경우에는  $FR1 < FR2 < FR3$ 의 순위로 가중값을 변경시키면서 가열봉을 제어하였다. 즉, 전 출력범위에서 PID 출력값 CV의 평균값을 가능한 한 50%로 유지하면서 제어가 수행되었다. 가중값 FR1, FR2, FR3은 운전원에 의해 입력으로 제공되는 변수이며, MMI(Man-Machine Interface) 화면을 통해 손쉽게 변경이 가능하도록 프로그램되었다.

### 2.2.2 일차계통 유량 제어

**그림 3**은 일차계통 유량제어를 위한 제어 로직의 구성도를 보여주고 있다. 일차계통 유량을 제어하는 제어기기는 일차계통 펌프(MCP)이며, 유량의 변경은 펌프의 회전수(RPM)를 VVVF 회전속도 제어기를 통해 변경함으로써 구현된다. 고온고압 열수력 실험장치의 일차계통에는 노심 입구 강수관에 터바인유량계(Turbine flowmeter)가 설치되어, 일차계통을 순환하는 일차냉각수 유량의 측정값을 제공한다. 그러므로, 유량계에서 측정되는 유량을 공정변수(PV)로 설정하고, 운전원이 설정한 목표 유량값을 설정값(SP)으로 하여 두 값의 차이가 PID 방정식에 입력으로 사용된다. PID 방정식의 출력값 CV는 VVVF 회전속도 제어기에 입력되어 MCP의 회전수가 변경되며 최종적으로 오차 E가 zero가 되도록 자동제어가 구현된다.

### 2.2.3 주급수 유량 제어

주급수는 주급수공급탱크에서 취수되어 주급수펌프를 통해 주급수제어밸브를 거쳐 증기발생기로 공급된다. 척도법에 따라 1/96로 축소된 SMART-P의 주급수유량 전 범위를 제어하기 위해 두 개의 주급수 제어밸브(CV-SND-01A, CV-SND-01)가 병렬로 설치되었다. 주급수 유량 최대값의 0~20% 유량범위는 소형밸브인 CV-SND-01A를 통해 제어되며, 20~100% 유량은 대형밸브인 CV-SND-01을 이용하여 제어되었다. 각 밸브는 설계된 제어유량 범위를 벗어나지 않도록 밸브

트림(trim)을 설계하였다.

본 실험에서는 주급수펌프 후단에 설치된 두 개의 주급수제어밸브(CV-SND-01A, CV-SND-01)를 제어기기로 사용하였으며, 주급수펌프의 회전수와 주급수공급탱크로의 회수배관에 설치된 회수밸브(bypass valve)의 개도(opening)는 제어를 용이하게 하기 위한 경계조건으로 사용하였다. 이 차계통에는 주급수제어밸브 후단에 주급수유량을 측정하기 위한 질량유량계(Coriolis flowmeter)가 설치되어 있다. 이 유량계에서 측정되는 실시간 유량을 공정변수(PV)로 하고 운전원이 MMI 화면에서 입력한 유량값을 설정값(SP)로 하여 두 값의 차이가 PID 방정식의 입력으로 사용된다. 계산된 출력값 CV는 주급수제어밸브를 구동하는 제어신호로 사용되어 자동제어가 구현된다.

## 2.2.4 주증기압력 제어

주증기압력은 증기발생기 후단에 설치된 주증기압력 제어밸브(CV-SND-03)를 통해 제어되었다. 증기발생기 출구에 설치된 압력센서에서 측정된 압력을 공정변수(PV)로 설정하고, 운전원이 MMI 화면에서 입력한 압력을 설정값(SP)으로 하여 두 값의 차이가 PID 방정식의 입력으로 사용되었다. 계산된 출력값 CV는 주증기압력제어밸브를 구동하는 제어신호로 사용되어 밸브의 개폐를 통해 주증기압력을 자동 제어하게 된다.

## 2.2.5 주급수온도 제어

주급수의 온도의 설계값은 40~70°C 이며, 급수온도의 제어를 위해 주급수공급탱크(FWST) 내부에 히터가 설치되어 있으며, 히터 출력 제어를 통해 주급수 온도를 제어하였다. 주급수공급탱크(FWST) 내부에는 열전대가 설치되어 주급수의 온도를 측정한다. 측정된 주급수 온도를 공정변수(PV)로 설정하고, 운전원이 MMI 화면에서 입력한 온도를 설정값(SP)으로 하여 두 값의 차이가 PID 방정식의 입력으로 사용되었다. 계산된 출력값 CV는 히터의 SCR 제어기를 구동하는 제어신호로 사용되어 주급수온도의 자동제어가 구현되었다.

## 2.2.6 주급수탱크(FWST) 수위 제어

주급수공급탱크(FWST)의 압력은 약 30~40bar로 유지되어, 주급수펌프가 급수를 취수하는 경계조건을 제공하게 된다. 장시간 실험을 수행하게 되면, 주급수공급탱크(FWST)의 수위는 떨어지게 되며, 이는 주급수공급탱크(FWST)의 압력감소를 유발하게 된다. 이러한 압력의 감소는 주급수펌프의 전단 경계조건의 변화를 유발시키며, 이로 인해 일정한 주급수공급을 위한 주급수유량제어밸브의 제어에 변동을 유발하게 된다. 그러므로, 실험수행 기간에는 주급수공급탱크(FWST)의 압력이 일정하게 유지되어야 한다. 이를 위해 주급수공급탱크(FWST)와 배관으로 연결되어 있는 보충수펌프를 제어기기로 사용하였다. 실험수행 도중 주급수공급탱크(FWST)의 수위가 감소하게 되면, 보충수펌프의 동작으로 추가의 급수를 주급수공급탱크(FWST)로 공급하게 된다. 주급수공급탱크(FWST)에 설치되어 있는 수위지시계의 계측신호를 공정변수(PV)로 설정하고, 운전원이

MMI 화면에서 입력한 주급수공급탱크(FWST) 수위를 설정값(SP)으로 하여 두 값의 차이가 PID 방정식의 입력으로 사용된다. 계산된 출력값 CV는 보충수펌프의 VVVF 회전속도 제어를 구동하는 제어신호로 사용되어 수위를 일정하게 자동 제어하였다.

### 3. 동특성 실험

SMART-P는 출력이 5% 미만일 경우에는 주급수 유량이 5%로 유지되며, 출력이 5% 이상일 경우에는 주급수유량이 출력과 선형적으로 비례하도록 설계되어 있다. 그러므로 출력변동에 따른 고온고압 열수력 실험장치의 동특성 검증 실험은 고온고압 열수력 실험장치가 주어진 정상상태 도달한 후 이차계통의 주증기 또는 주급수 유량을 Step 또는 Ramp로 증감시킴으로 다른 정상상태에 도달하는 Turbine Reading 방법에 의해 수행되었다.

#### 3.1 동특성 실험 Test Matrix

동특성 실험은 출력 변화에 따른 고온고압 열수력 실험장치의 일·이차측 주요 열수력 변수 및 주요 기기들의 동적 변화를 고찰하기 위한 것이다. 출력의 변화는 이차계통의 주급수 유량의 변화를 통해 이루어졌다. 본 연구에서는 동특성 실험을 시작하기 전의 정상상태 기준출력, 출력변화방법 및 출력변화율을 고려하여 총 14가지의 동특성 실험 경우가 도출되었으며 각 실험 경우에 대한 Test Matrix는 표 2에 정리되어 있다. Test ID은 H-Pxx-Yzz로 명명되었는데, 여기서 xx는 숫자로서 동특성 실험을 시작하는 기준 출력의 백분율을 의미하고, Y는 알파벳 S 또는 R 중의 하나를 의미하는데 S는 Step, R은 Ramp 증가/감소를 각각 의미한다. 마지막 숫자 zz는 출력의 절대 증가율을 의미한다.

#### 3.2 실험수행 절차 및 방법

동특성 실험을 수행하기 위해서는 우선 고온고압 열수력 실험장치가 기준출력상태에서 정상운전 상태에 있어야 한다. 이러한 정상운전상태를 실험의 초기 조건으로 하여 출력의 변화를 줌으로써 일·이차계통의 열수력 변수들을 관찰하였다. 우선 실험의 초기 조건인 정상상태에 도달하는 절차는 다음과 같다.

1. 노심, 가압기 및 각종 탱크류에 대한 초기 충수
2. 압력계 및 차압계 계측라인의 공기배출
3. 질소가스를 이용한 가압기 가압 (50 ~ 55bar)
4. 질소가스를 이용한 주급수공급탱크 가압 (30 ~ 40 bar)
5. 가압기 UAC(Upper Annular Cavity)의 초기 수위 제어
6. 주냉각재펌프(MCP) 기동중 공기배출
7. 기기냉각수 계통 작동
8. 이차측 저출력상태에서 가열운전 시작

9. 이차측이 정상상태 설계값에 ( $P=147\text{bar}$ ,  $T=300^{\circ}\text{C}$ ) 도달할 때까지 가열율을 수동으로 제어하여 Quasi-steady state 유지
10. Quasi-steady state 상태에서 자동제어 운전 시작
11. 이차측 주증기압 0 ~ 35.5 bar로 수동제어에 의한 증가
12. 이차측 주급수 유량 기준출력값으로 수동제어에 의한 증가
13. 기준출력값의 정상상태에 도달하면 자동제어 운전 시작
14. 기준출력값에서 이차측 주급수유량의 step/ramp 변화에 의한 동특성 실험 수행

고온고압 열수력 실험장치가 기준 출력 정상상태에 도달한 것을 확인한 후 출력의 과도변화에 따른 실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행된 출력의 Step 및 Ramp로 증가/감소방법에 대한 개념은 **그림 4**에 표시되어 있다. 우선 기준 출력에서 출력증가율에 따른 고출력으로 출력을 Step 또는 Ramp로 증가시킨다. 이러한 출력 증가는 이차측 주급수유량의 증가를 통해 이루어진다. 고온고압 열수력 실험장치가 증가된 고출력 상태로 정상상태에 도달할 때까지 일·이차계통의 각종 열수력 변수들에 대한 데이터를 획득한다. 정상상태 도달을 확인한 후 기준 출력상태로 출력을 감소시킨다. 출력감소에 따른 고온고압 열수력 실험장치의 동특성을 확인한 후 이번에는 기준 출력보다 작은 저출력으로 출력을 감소시킨다. 일정한 시간이 경과하여 저출력상태에서의 정상상태를 확인한 후 끝으로 출력증가를 통해 기준 출력으로 환원한다. Step 출력 증가/감소는 순간적인 주급수유량의 증가/감소를 의미한다. Ramp 출력 증가/감소는 출력의 증감을 기준출력에서 도달출력으로 선형 증가/감소하는 것을 의미한다. 본 연구에서 Ramp 출력증감은 SMART-P의 출력증감율 1%/sec를 모사하기 위하여 동일한 출력증가율을 사용하였다.

#### 4. 결과 및 분석

실험결과는 3가지의 그래프(상단, 중간, 하단)로 정리되었다. 상단의 그래프는 Step 및 Ramp 충격에 대한 이차측 유량 응답 및 주급수제어밸브의 개도 응답을 보여준다. 중간의 그래프는 일·이차측 압력 응답 및 주증기압 제어밸브의 개도 응답을 보여주며, 하단의 그래프는 일차측 노심 입구 및 출구온도와 무차원화된 히터출력을 보여주고 있다.

고온고압 열수력 실험장치의 출력증가/감소 운전에 대한 응답반응은 각 제어기기들에 설정되어 있는 P, I, D 값 및 제어기기 유동 상류측 열수력 경계 조건들에 의존하게 된다. Test Matrix에 선정되어 있는 모든 실험 경우들에 대해서 동일한 P, I, D 값 및 경계조건을 사용하는 것은 실제적으로 불가능하며, 해석적으로 도출하는 것도 역시 불가능하다. 이러한 제어변수(P, I, D 값) 및 경계조건들은 0 ~ 100%의 전 출력범위의 실험을 통하여 경험적으로 획득되어야 한다. 본 연구에서는 우선 실험 수행 전에 사전 실험적 연구를 통해 주요 제어기기들(가열봉 히터, 주냉각재펌프, 주급수제어밸브, 주증기제어밸브) 각각에 대한 P, I, D 값들을 독립적으로 결정하였다. 이 사전 실험적 연구는 각 제어기기의 독립적인 운전을 통해 수행되었다. 즉, 모든 계통을 운전하는 것이 아니라 대상이 되는 단일 제어기기만을 독립적으로 운전을 하면서 최적의 P, I, D 값을 도출하였다. 본 실험에서는 이렇게 도출된 각 제어기기들의 P, I, D 값들을 초기 추정값으로 사용하였으며, 각 계통의 상류 경계조건 및 출력에 따라 제어가 가능/용이하도록 최적화하였다. **표 3**은 모든 실험 경우들에 대해 사용된 제어변수들 및 상류측 경계조건을 요약하여 보여주고 있다.

그림 5에서 8은 대표적인 실험결과를 보여주고 있다. 그림 5는 기준출력 10%에서 출력을 절대 출력 증가율 5%로 Step 증가 및 감소를 수행한 경우의 실험결과다. 우선 상단 그래프를 보면, 기준 출력 10%에 해당하는 0.025kg/s의 주급수유량이 초기조건으로 유지되고 있다가 약 220초경 주급수유량 설정값을 출력 15%에 해당하는 0.0375kg/s로 step 증가시켰다. 주급수유량 설정값의 갑작스런 증가는 측정되는 주급수유량과의 차이(error)를 유발시키며, 이 차이는 PLC에 인식된 자동 제어로직에 의해 주급수제어밸브가 열리게 된다. 주급수제어밸브의 초기에 5%에서 40%로 급격히 열린 후 시간이 경과함에 따라 새로운 정상상태 12% 개도로 수렴하게 된다. 즉, 밸브의 개도는 과도한 과잉응답(overshoot)이 발생하고 있음을 관찰할 수 있다. 측정된 이차측 급수유량 또한 밸브의 동특성과 유사한 과잉응답과정을 통해 새로운 정상상태로 도달하게 된다.

갑작스런 이차측 급수유량의 증가는 일차측에서 이차측으로의 열제거량의 증가를 의미하며, 이는 일차측의 압력 및 온도의 감소를 유발하게 된다. 일차측 압력은 초기 147 bar에서 약 138 bar로 떨어졌다가 다시 회복되며, 노심 출구온도는 초기 300°C에서 297°C로 떨어졌다가 다시 회복되는 것을 볼 수 있다. 이러한 압력 및 온도의 회복은 노심출구온도를 300°C로 유지하는 제어로직으로 인해 기인한다. 이차측 조건의 변동으로 인하여 측정된 일차측 노심 출구온도가 설정값인 300°C보다 감소하게 되면, PLC의 자동제어 로직에 의하여 이 차이를 제거하기 위하여 노심의 출력이 증가하게 된다. 하단의 그래프는 이러한 노심출력의 증가를 무차원화된 변수를 통해 보여주고 있다. 노심 출력 역시 주급수밸브의 경우에서와 같은 과잉응답특성을 보여주고 있다. 그러나, 노심출력의 과잉응답특성은 주급수제어밸브의 특성보다는 과도하지는 않다.

이차측 압력의 응답특성은 중간 그래프에서 볼 수 있는데, 갑작스런 주급수유량의 증가는 동시에 주증기유량의 증가로 이어지고, 이는 주증기압의 증가를 유발하게 된다. 그래프에서 볼 수 있듯이 주증기압력이 초기 35.5bar에서 약 38bar까지 순간적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 주증기압력은 주증기 배관에 부착되어 있는 제어밸브로 제어되는데, 증가된 주증기압력은 설정값 35.5bar와의 차이(error)를 유발하고 PLC에 인식된 자동제어로직에 의하여, 주증기제어밸브가 열림으로써 차이가 제거된다. 중간 그래프에서 주증기제어밸브의 열리는 응답특성을 확인할 수 있다. 이 경우 주증기 제어밸브는 과잉응답특성을 거의 보이지 않으면서 새로운 정상상태로 잘 따라감을 볼 수 있다.

고온고압 열수력 실험장치는 출력 10%의 초기 조건에서 220초경 출력 5% Step 증가에 대해 700초경에 출력 15%의 새로운 정상상태에 도달하게 된다. 이 과정에 480초가 소요되었다. 15% 출력의 새로운 정상상태 도달 후 급수유량을 5% Step 감소하여 출력을 10%로 환원하는 실험을 연이어 수행하였다. 이 과정에서의 일·이차측 열수력변수들의 응답반응 메커니즘은 5% Step 증가의 경우와 반대로 쉽게 해석될 수 있다. 특이한 점은 상단 그래프에서 볼 수 있듯이 주급수제어밸브의 응답반응이 상당히 좋다는 것이다. 5% Step 증가의 경우에는 과잉응답특성이 관찰되었으나, 5% Step 감소의 경우에는 이에 해당하는 부족응답특성(undershoot)이 관찰되지 않는다는 것이다.

출력이 초기조건인 10%로 회복되어 정상상태에 도달한 후 이번에는 이어서 출력은 5% Step 감소하는 실험을 수행하였다. 이 경우에는 주급수 유량은 5% (0.0125kg/s)로 줄게 되는데, 너무 작은 유량으로 인하여 밸브의 제어범위를 벗어나게 되며, 이로 인해 주급수 유량이 진동하는 결과를 얻게된다. 이 경우에는 소유량범위의 주급수제어밸브를 병렬로 설치하여 사용한다면, 이러한 진동문제가 해결될 수 있을 것이다. 또는 주급수공급탱크(FWST)의 압력을 낮게 설정한다면 주급

수의 제어가 용이해질 것으로 생각된다. 현재 주급수공급탱크(FWST)의 압력은 약 30 bar 정도로 유지되었는데, 만약 FWST의 압력을 이보다 낮게 설정한다면, 주급수제어밸브가 더 열리게 되어 제어밸브의 제어범위 안에 들 것으로 생각된다.

그림 6과 7은 각각 기준출력 50%에서 출력을 5% Step 또는 Ramp[ 증가 및 감소를 수행한 실험 결과를 보여주고 있다. 이 경우 출력 증감 요인에 대한 열수력 응답특성은 그림 5와 동일하게 해석될 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 출력의 증감방법에 따른 차이는 크게 관찰되지 않는다. 그림 8은 기준출력 75%에서 출력을 10% Ramp 증가한 실험결과를 보여주고 있으며, 열수력 응답특성도 그림 5와 동일하게 해석될 수 있다.

## 5. 결론 및 요약

출력변동에 따른 고온고압 열수력 실험장치의 열수력 동특성을 고찰하기 위해 일·이차계통의 주요 열수력 변수들에 대한 자동제어 계통이 설치되었다. 자동제어 계통은 PLC를 이용하여 구현되었으며, 가열봉 출력, 주냉각재펌프 회전속도, 주급수 유량, 주증기 압력, 주급수 온도 및 주급수 공급탱크 수위를 주요 열수력 제어변수로 사용하였다. 열수력 동특성 실험은 기준출력과 출력 증감율에 따라 총 14가지의 Test Matrix를 구성하여 수행하였다. 출력변동 요인은 주급수 유량의 증감으로 구현하였으며, 증감율은 5%와 10%, 증감방법은 Step 및 Ramp 두 가지를 고려하여 실험을 수행하였다. Ramp 증감방법은 1%/sec의 증감율을 사용하였다.

본 연구에서는 Test Matrix에 설정된 동특성 실험을 통해 열수력 주요 변수의 동특성을 실험적으로 관찰하였으며, Test Matrix 중 가장 급격한 변동인 10% Step 증가 요인에 대해서 가열봉 출력, 일차계통 압력 및 온도, 이차계통 주증기압력 등을 포함하는 주요 열수력 변수들이 잘 제어되는 것이 확인되었다. 우선 증감방법에 따른 효과는 큰 차이가 없음이 발견되었다. 출력에 따라 약간의 차이는 존재하지만 Step 증가방법과 Ramp 증가방법에 따른 응답반응은 거의 동일한 특성을 보여주고 있다. 본 실험에서는 주급수제어밸브 상류측 이차계통의 경계조건이 응답특성에 크게 영향을 미치고 있는 것이 관찰되었다. 특히 주급수공급펌프의 회전속도, 주급수공급탱크의 압력은 주급수제어밸브의 응답특성에 크게 영향을 미치므로 보다 정교한 상류측 경계조건이 제어에 필요하다고 생각된다. 각 제어기기의 제어변수인 P, I, D 값은 응답특성을 직접적으로 좌우하는 가장 중요한 변수인데, 본 연구에서는 기준 출력을 10%에서 75%까지 증가시키면서 최적의 P, I, D 값을 경험적으로 도출하려 시도하였다. 추후 보다 자세한 연구가 수행되어야 하겠지만, 현재까지 수행한 실험결과를 근거로 추정하건데, 전 출력범위에서 동일한 P, I, D 값을 사용하는 것은 제어범위를 벗어나는 듯 보인다. 이에 대한 정량화 작업 및 각 열수력 변수들의 시상수(time constant)에 대한 정량화 작업은 위해서는 향후 추가적인 실험이 요구된다.

## 참고 문헌

- [1] 이성재 외, “고온고압 열수력 실험장치의 기본설계,” 10394-TE-RR840-02, Rev. 0, 2001.
- [2] K. Y. Choi, H. S. Park, S. Cho, C. K. Park, S. J. Lee, C. H. Song, and M. K. Chung, “Overall Thermal-Hydraulic Test Facility for System-Integrated Modular Advanced Reactor,” NURETH-10, Seoul, Korea, October 5-9, 2003.

- [3] 장문희 외, “일체형원자로(SMART) 기본설계 보고서,” KAERI/TR-2142/2002, 2002.  
 [4] 이규형 외, “SMART 기본설계 성능평가,” KAERI/TR-2171/2002, 2002.  
 [5] 양수형 외, “SMART 기본설계 안전성 평가,” KAERI/TR-2173/2002, 2002

표 1 고온고압 열수력 실험장치의 제어기기 목록

제어기기	공정변수	설정값	제어신호
가열봉 (Group 1,2,3)	노심출구 온도 ( $T_{hot}$ )	300 °C or programmable	Heater power
MCP	일차계통 유량	35%/100% or user input	MCP speed
주급수제어 밸브1, 2	주급수 유량	user input	valve position
주증기압제어 밸브	주증기 압력	35.5 bar or user input	valve position
FWST 내부 히터	주급수 온도	40 ~70 °C	Heater power
보충수펌프	주급수공급탱크 수위	80% or user input	MWP speed

표 2 고온고압 열수력 실험장치 동특성 실험을 위한 Test Matrix

Test #	Test ID	기준출력	출력증감 방법	출력 증감율	증감과정시 출력
1	H-P10-S5	10%	Step	5%	10%→15%→10%→5%→10%
2	H-P10-R5	10%	Ramp	5%	10%→15%→10%→5%→10%
3	H-P25-S5	25%	Step	5%	25%→30%→25%→20%→25%
4	H-P25-R5	25%	Ramp	5%	25%→30%→25%→20%→25%
5	H-P25-S10	25%	Step	10%	25%→35%→25%→15%→25%
6	H-P25-R10	25%	Ramp	10%	25%→35%→25%→15%→25%
7	H-P50-S5	50%	Step	5%	50%→55%→50%→45%→50%
8	H-P50-R5	50%	Ramp	5%	50%→55%→50%→45%→50%
9	H-P50-S10	50%	Step	10%	50%→60%→50%→40%→50%
10	H-P50-R10	50%	Ramp	10%	50%→60%→50%→40%→50%
11	H-P75-S5	75%	Step	5%	75%→80%→75%→70%→75%
12	H-P75-R5	75%	Ramp	5%	75%→80%→75%→70%→75%
13	H-P75-S10	75%	Step	10%	75%→85%→75%→65%→75%
14	H-P75-R10	75%	Ramp	10%	75%→85%→75%→65%→75%

표 3 실험별 제어변수 및 상류측 운전조건 목록

Test #	Test ID	가열봉			주급수제어밸브 (CV-SND-01)			주증기제어밸브 (CV-SND-03)			주냉각재펌프 (MCP)			주급수회수 밸브개도 (%)	주급수 펌프 회전속도 (%)	FWST 압력 (bar)
		P	I	D	P	I	D	P	I	D	P	I	D			
1	H-P10-S5	0.5	0.5	0.1	0.4	0.5	0.1	0.05	0.49	0.0	0.9	2.0	0.0	5	70	30.4
2	H-P10-R5	0.5	0.5	0.1	0.4	0.5	0.1	0.05	0.49	0.0	0.9	2.0	0.0	5	70	30.4
3	H-P25-S5	0.5	0.5	0.1	0.4	0.5	0.1	0.05	0.49	0.0	0.9	2.0	0.0	5	90	30.4
4	H-P25-R5	0.5	0.5	0.1	0.4	0.5	0.1	0.05	0.49	0.0	0.9	2.0	0.0	5	90	30.4
5	H-P25-S10	0.5	0.5	0.1	0.4	0.5	0.1	0.05	0.49	0.0	0.9	2.0	0.0	5	90	30.4
6	H-P25-R10	0.5	0.5	0.1	0.4	0.5	0.1	0.05	0.49	0.0	0.9	2.0	0.0	5	90	30.4
7	H-P50-S5	0.6	0.4	0.0	0.4	0.5	0.1	0.05	0.49	0.0	0.9	2.0	0.0	5	90	31.6
8	H-P50-R5	0.6	0.4	0.0	0.4	0.5	0.1	0.05	0.49	0.0	0.9	2.0	0.0	5	90	31.6
9	H-P50-S10	0.6	0.4	0.0	0.4	0.5	0.1	0.05	0.49	0.0	0.9	2.0	0.0	5	100	31.7
10	H-P50-R10	0.6	0.4	0.0	0.4	0.5	0.1	0.05	0.49	0.0	0.9	2.0	0.0	5	100	31.7
11	H-P75-S5	0.6	0.4	0.0	0.4	0.5	0.1	0.1	0.49	0.0	0.9	2.0	0.0	5	100	42.1
12	H-P75-R5	0.6	0.4	0.0	0.4	0.5	0.1	0.1	0.49	0.0	0.9	2.0	0.0	5	100	42.0
13	H-P75-S10	0.6	0.4	0.0	0.4	0.5	0.1	0.1	0.49	0.0	0.9	2.0	0.0	5	100	38.4
14	H-P75-R10	0.6	0.4	0.0	0.4	0.5	0.1	0.1	0.49	0.0	0.9	2.0	0.0	5	100	38.8

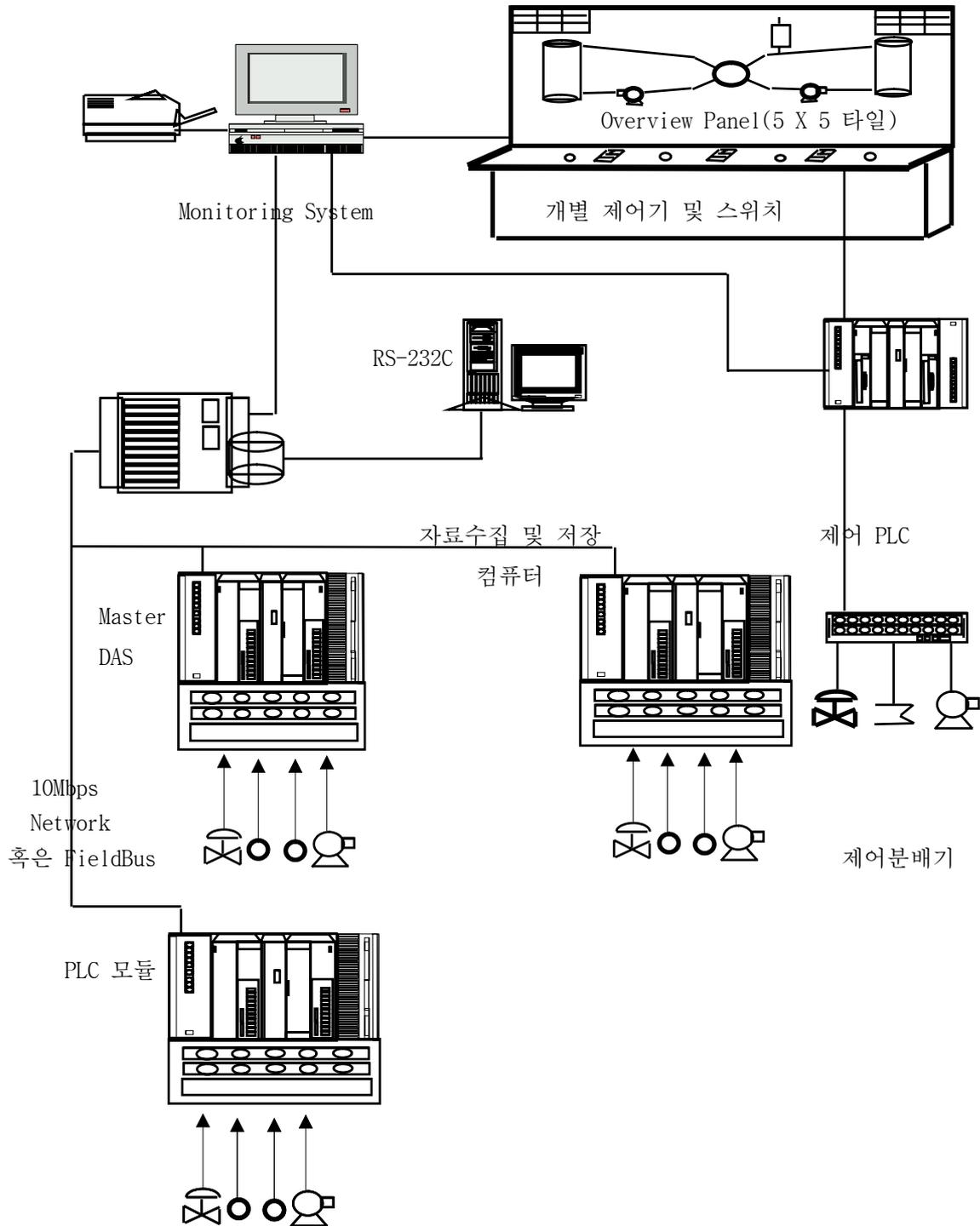


그림 1 고온고압실험시설 계측제어계통 구성

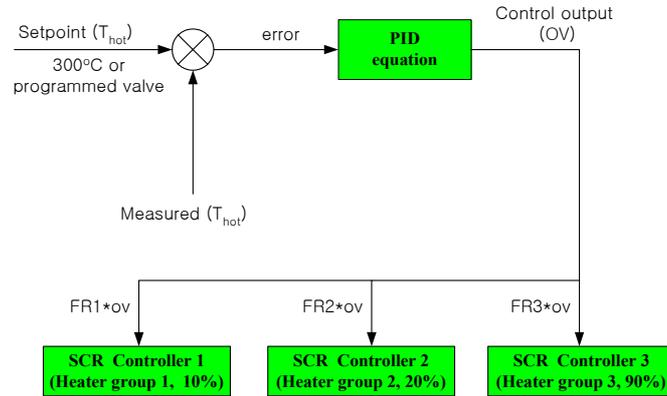


그림 2 가열봉 제어로직 구성도

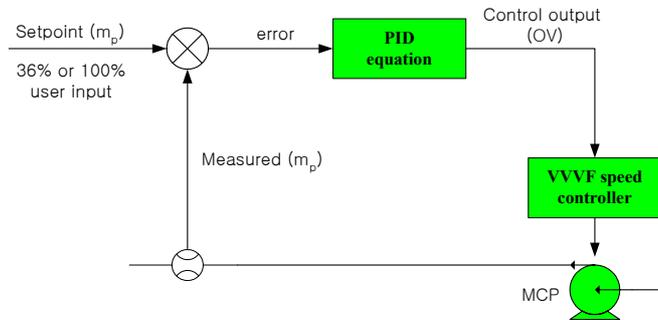
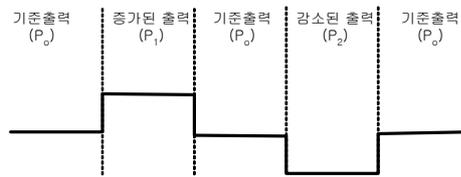
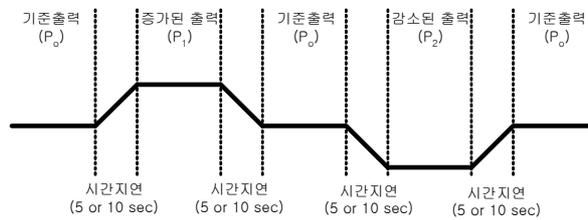


그림 3 일차계통 유량 제어 로직 구성도



출력 Step 증감발



출력 Ramp 증감발

그림 4 Step/Ramp 출력 증가/감소 과정 개념도

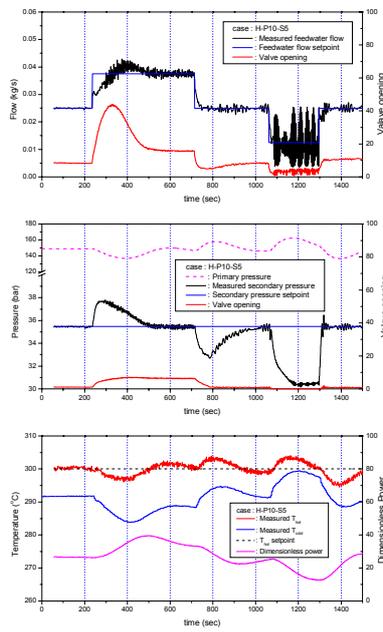


그림 5 H-P10-S5 경우의  
일·이차측 동특성 결과

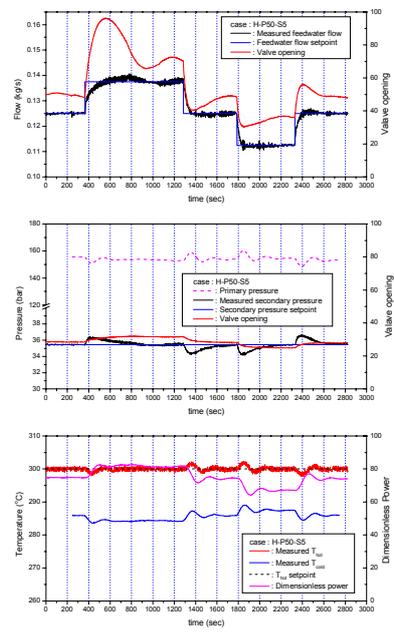


그림 6 H-P50-S5 경우의  
일·이차측 동특성 결과

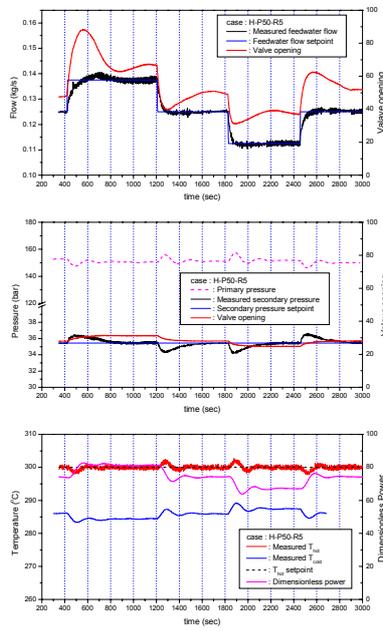


그림 7 H-P50-R5 경우의  
일·이차측 동특성 결과

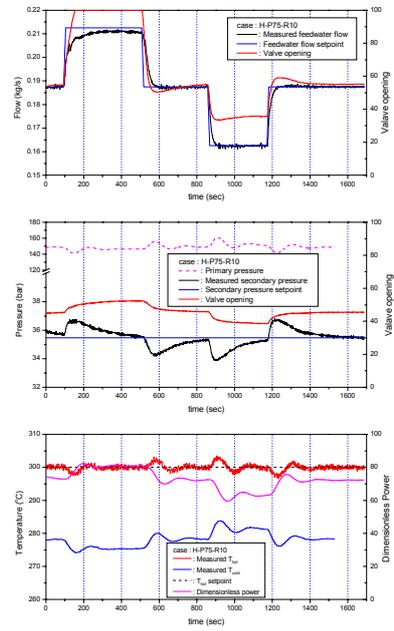


그림 8 H-P75-R10 경우의  
일·이차측 동특성 결과