

일체형 원자로의 출력변동 및 주냉각재펌프 천이운전에 관한 실험적 연구

Experimental Studies on Power Change and MCP Transient Operation for the SMART-P

최기용, 박현식, 조석, 이성재, 박준경, 최남현, 민경호, 송철화, 정문기

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART-P 원자로의 계통 설계를 검증하기 위하여 한국원자력연구소에서 제작된 고온고압 열수력 실험장치(VISTA)를 이용하여 출력변동 및 주냉각재펌프의 천이운전에 대한 열수력 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 노심 가열봉을 T제어 또는 T+N제어를 하면서 노심 출력을 20%에서 25%로 증감하면서 일·이차계통의 동특성을 고찰하였다. 노심 가열봉을 T+N제어로 할 경우 T제어를 할 경우에 비하여 계통변수의 과잉응답특성이 줄어드는 경향을 보이나, T+N제어 방식의 허용변화폭(dead band)의 존재로 인하여 이산적인 출력값의 변화를 보였다. 주냉각재펌프 천이운전은 노심 출력을 25%로 유지하면서 저속운전 모드에서 중속운전 또는 자연순환 운전모드로 주냉각재펌프의 회전속도를 변화시키면서 수행하였다. 자연순환운전으로 천이 운전할 경우 T+N제어를 사용하면 계통변수들의 급변 없이 MCP 천이운전이 순조롭게 이루어지는 반면 T제어방식을 사용하면 계통 변수들이 발산하는 결과를 얻었다. 노심 출력 25%에서 자연순환 운전이 도달했을 때 일차계통 냉각수의 자연순환 유량이 매우 안정적이라는 실험결과를 얻었다.

Abstract

Experimental studies on power change and MCP transient operation for the SMART-P are carried out in order to verify the system design of the SMART-P. Dynamic system characteristics are investigated for the power change from 20% to 25% when the core power is controlled by either the T-control or the T+N control method. When the core power is controlled by the T+N control method, the overshooting is much reduced but the power is controlled in a discrete manner due to the dead band effects of the T+N control. The MCP transient operation is performed by changing the MCP speed from the low speed mode to either the mid-speed or the natural circulation mode, in which the core power is kept at 25% level. During the MCP transient to the natural circulation mode, the MCP speed change is secured without any abrupt change of the thermal-hydraulic parameters for the T+N control method. Whereas, the T control method caused the thermal-hydraulic parameters to diverge. During the natural circulation operation at the power of 25%, the stable primary natural circulation flow was achieved.

1. 서 론

고온고압 열수력 실험장치 VISTA[1-6]는 SMART-P[7]를 기준 원전으로 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 [7-9]에 자세히 나타나 있다. 고온 고압 열수력 실험장치에는 일·이차계통의 열수력 변수들을 운전원의 요구에 따라 제어하기 위한 자동제어시스템이 설치되었다. 일차측에는 노심 가열봉 히터 출력 및 주냉각재펌프 회전속도를 제어하기 위한, 이차측에는 주급수 유량, 주급수 온도, 주증기 압력을 제어하기 위한 자동제어 시스템이 구축되었다. 이 외에 고온고압 열수력 실험장치를 정상상태로 유지하기 위한 보조계통과 기동, 가열, 출력변동 등의 과도운전을 수행하기 위한 자동운전계통에도 자동제어 시스템이 구축되었다. 자동제어 시스템을 구동하기 위한 로직은 PID 제어방법을 사용하였다. 고온고압 열수력 실험장치의 주요 열수력 기기의 자동제어 로직에 관한 상세한 내용은 참고문헌 [4]에 자세히 기술되어 있다.

고온고압 열수력 실험장치는 기준 원전인 SMART-P의 설계 검증 실험을 위하여 SMART-P의 노심 출력제어방식과 동일하도록 노심 가열봉 출력 제어방식을 T-Control과 T+N Control을 선택할 수 있도록 제어로직을 구성하였다. 본 연구에서는 노심 가열봉 출력제어 방식에 따른 출력 변동 특성 실험 및 저속운전에서 주냉각재펌프의 천이운전 실험을 수행하였다. 특히 노심 출력제어 방식에 따른 계통의 천이특성에 큰 영향을 미칠 것으로 추정되는 주냉각재펌프 저속운전(900rpm)에서의 출력 변동과 주냉각재펌프 회전속도의 증감을 실험적으로 고찰하였다. 출력변동은 주냉각재펌프 저속운전에서 20%에서 25%로의 출력으로 1%/sec와 3%/sec의 출력 변동률을 고려하였다. 주냉각재펌프 회전속도의 천이는 저속운전(900rpm)을 기준으로 하여 중속운전(1800rpm)과 자연순환으로의 천이를 실험적으로 고찰하였다.

2. 자동 제어 계통

고온고압 열수력 실험장치의 자동 제어 로직의 구현을 위해서 하드웨어적으로는 Allen-Bradley사의 PLC-5 processor 제어기를 설치하였으며, 소프트웨어로는 RSLogix 5를 사용하였다. 각종 계측기 및 현장기기에서 들어오는 신호들은 계측계통과 제어계통으로 분류되어 입력되며, 필요시 신호격리기(signal isolator)를 통해 계측계통과 제어계통에 동시에 입력된다. 고온고압 열수력 실험장치의 과도 운전을 원활히 수행하기 위하여 일·이차계통의 주요 기기들에 대하여 자동제어로직을 설치하였다. 자동제어 로직이 설치된 주요기기들은 가열봉 히터 그룹 1, 2, 3, 주냉각재펌프(MCP), 주급수제어 밸브1, 2, 주증기압력 제어밸브, 주급수공급탱크 히터, 보충수 펌프다. 각 자동제어 기기들의 공정변수, 설정값, 제어신호들은 표 1에 정리되어 있다.

2.1 가열봉 출력 제어 논리

가열봉의 전기 출력은 SCR(Silicon Controlled Rectifier) 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.

SMART-P의 정상운전 출력 변화시 노심 출력을 제어할 수 있는 제어방식은 T-Control과 T+N Control로 분류할 수 있다.[10-11] 본 연구에서는 SMART-P의 노심 출력 제어방식과 동일한 제어로직을 VISTA 실험장치에 사용했으며, 노심 출력 제어방식에 따른 계통의 동특성을 고찰하기 위하여, 노심 가열봉 히터의 출력제어 방식을 T-Control 또는 T+N Control로 선별적으로 선택할 수 있도록 제어로직을 구성하였다. 그림 1과 2는 가열봉 제어 로직 T-Control과 T+N Control의 제어 블록 구성도를 각각 보여주고 있다.

그림 1은 노심 출구온도만을 이용하여 가열봉을 제어하는 T-Control 제어방식을 보여주고 있다. 계측기를 통해 측정한 노심 출구 온도를 공정변수(PV)로 하고, 운전원이 설정한 노심 출구온도를 설정값(SP)으로 하여 두 값의 차이(E)가 zero가 되도록 제어가 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. 전 실험 범위에서 PID 출력값 CV의 평균값을 가능한 50%로 유지하도록 가중값을 조정하였으며, 노심 가열봉 히터의 열속(Heat Flux)이 균일하도록 동일한 가중값을 사용하였다. 가중값 FR1, FR2, FR3은 MMI(Man-Machine Interface) 화면을 통해 운전원이 손쉽게 변경이 가능하도록 프로그램 되었다.

그림 2는 노심 출구온도와 노심 출력을 이용하여 가열봉을 제어하는 T+N Control 제어방식을 보여주고 있다. SMART-P에서는 5% 출력 이상에서 주급수유량의 백분율은 기준출력의 백분율과 동일하게 설계되어 있다. 출력 5% 이상의 조건에서 주급수유량의 백분율로부터 기준 출력을 얻고, 기준출력으로부터 참조 출력-온도 프로그램에 의하여 기준 노심 출구온도를 얻는다. 참조 출

력-온도 프로그램은 그림 3에 나타나 있다. 기준 노심 출구온도와 측정된 노심 출구온도와의 오차를 식(2)와 같이 매개변수 U1으로 설정한다. 출력에 대해서는 고온고압 열수력 실험장치의 경우 피할 수 없는 자체 열손실량이 존재하게 된다. 열손실량은 주변의 대기 온도와 구조물에 축적된 축적에너지(Stored Energy)에 따라 달라지게 되며, 실험을 통해 측정된 양은 약 10~20kW 정도로 추정된다. 그러므로 T+N Control을 시작하기 전 정상상태에서의 열손실량을 측정하여 열손실량과 기준출력 N_{ref} 를 합하여 제어용 기준출력 N'_{ref} 를 얻는다. 이렇게 얻은 제어용 기준출력 N'_{ref} 와 측정된 출력과의 오차는 식(3)과 같이 매개변수 U2로 설정한다.

$$U1=0.333(T-T_{ref}) \quad (2)$$

$$U2=0.5(N-N'_{ref}) \quad (3)$$

$$U=U1+U2 \quad (4)$$

두 매개변수 U1과 U2와의 합한 식(4)의 U를 이용하는 제어방식이 T+N Control이 된다. SMART-P는 온도와 노심출력의 허용 변화폭을 식(5)와 같이 각각 $\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\%$ 로 제한하고 있다.[11]

$$|0.333(T-T_{ref})+0.5(N-N'_{ref})|>1.0 \quad (5)$$

즉, SMART-P의 T+N Control은 온도편차와 노심출력 편차의 합이 1보다 커지거나 1보다 작으면 CEDM이 움직이게 된다. 이러한 허용변화폭의 효과는 VISTA 실험장치에서 제어용 PLC의 dead band를 1.0으로 설정함으로써 구현할 수 있다. 또한 SMART-P 핵연료의 특성인 지연시간을 고려하기 위하여 PLC의 출력값을 히터제어용 SCR 제어기로 입력되기 전에 Timer를 거칠 수 있도록 제어로직을 구성하였다. Timer는 히터 제어용 출력의 지연시간(delay time)을 설정하기 위한 제어 블록으로 사용자가 입력하는 지연시간(sec)만큼 PLC 출력값을 지연시켜 SCR 제어기로 보내주는 기능을 수행한다. 본 연구에서는 지연시간 효과는 고려하지 않았다.

2.2 출력 증/감소 운전 제어 논리

그림 4는 출력증감 운전 제어 블록의 구성도를 보여주고 있다. 출력증감의 구현은 이차계통 주급수 유량의 증감을 통해 이루어진다. 그림에서 볼 수 있듯이 운전원은 초기 급수유량, 목표 급수유량 및 출력 증감률을 입력할 수 있다. 본 연구에서는 출력 증감률 $\pm 1\%/sec$ 와 $\pm 3\%/sec$ 를 고려하였다. 운전원이 입력한 초기 급수유량, 목표 급수유량 및 출력 증감률에 따라 주급수 유량 제어 블록의 설정값(SP)은 시간에 따라 변화하게 된다. 설정값(SP)과 측정값(PV)의 오차는 PID 방정식에 입력되어 필요한 출력값이 계산되며, 이 출력값은 주급수 제어밸브(CV-SND-01)의 개도를 변화시키게 된다.

이차측 주증기압력은 출력의 함수이므로 주급수유량(or 출력) 설정값의 변함에 따라 이차측 주증기압력의 설정값도 변해야 한다. 그러므로 변경된 주급수유량(or 출력) 설정값에 따라 이차측 주증기압력의 설정값이 참조 출력-주증기압력 프로그램에 의해 변하게 된다. 주증기압력 설정값(SP)과 측정값(PV)의 오차는 주증기압력의 제어를 위해 주증기압 제어 블록의 PID 방정식에 입

력된다. 이 제어 블록에서 계산된 출력값은 주증기압력 제어밸브(CV-SND-03)의 개도를 변화시켜 주증기 압력을 제어하게 된다. 그림 5는 본 연구에서 사용된 단순화된 참조 출력-증기압력 프로그램을 보여주고 있다. 출력 증감 운전 제어논리는 1초에 1번씩 동작되도록 설정되었다.

2.3 주냉각재펌프 회전속도 천이운전 제어 논리

그림 6은 주냉각재펌프 회전속도 제어 블록의 구성도를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 운전원은 초기 회전속도, 목표 회전속도 및 회전속도 증감률을 입력할 수 있다. 본 연구에서는 회전속도 증감률 $\pm 30\text{rpm/sec}$ 및 $\pm 60\text{rpm/sec}$ 를 고려하였다. 운전원이 입력한 초기 회전속도, 목표 회전속도 및 회전속도 증감률에 따라 주급수펌프 회전속도의 설정값이 시간에 따라 변화하게 된다. 회전속도의 설정값은 회전속도-일차냉각수유량 프로그램에 따라 일차냉각수 유량으로 환산된다. 일차냉각수 유량 설정값(SP)과 측정값(PV)의 오차는 PID 방정식에 입력되어 필요한 출력값이 계산되며, 이 출력값은 주냉각재펌프의 VVVF 제어기로 입력되어 주냉각재펌프 회전속도를 변화시키게 된다. 그림 7은 본 연구에서 사용된 참조 주냉각재펌프 회전수-유량 프로그램을 보여주고 있다.

3. 실험 결과 및 분석

표 2는 본 연구에서 수행한 실험의 Test Matrix를 보여주고 있다. 출력 증감 실험의 기준조건은 20% 출력으로 설정하였으며, 이때 MCP는 저속운전(900rpm) 모드에서 운전된다. 출력 증감률은 1%/sec와 3%/sec를 고려하였다. 목표 출력은 25%이며, 20% 출력에서 25%로 증가시켰다가 다시 20% 감소시키는 실험을 수행하였다. 각 실험에 대하여 노심 히터제어방식은 T-Control 또는 T+N Control를 사용하여 실험결과를 비교 고찰하였다.

MCP 회전속도 천이운전은 MCP 저속운전(900rpm)을 기준조건으로 하여 증/감소를 30rpm/sec로 중속으로 천이하거나 자연순환 모드로 천이하여 계통특성을 관찰하였다. 노심 히터 제어방식은 T+N Control 제어방식을 사용하였으며, 저속에서 자연순환 모드로 천이하는 운전은 노심 히터를 T-Control과 T+N Control 제어방식을 각각 사용하여 실험결과를 비교하였다.

3.1 출력 증/감소 운전

출력증가/감소 운전 실험은 고온고압 열수력 실험장치를 기준 조건인 출력 20% 정상상태에 도달시킨 후에 수행하였다. 모든 경우에 주냉각재펌프는 저속(900rpm)으로 운전하였다. 정상상태의 도달을 위하여 일차계통은 초기 저온정지 상태에서 최대 300°C/hr 의 가열율로 가열된다. 가열운전은 자동 가열운전 제어로직을 이용하여 수행되며, 이때 이차계통은 운전원의 수동 운전에 의한 주급수유량의 증가를 통해 출력이 20% 정상상태까지 서서히 증가하게 된다. 이 과정에서 노심 가열봉은 T-Control 제어를 수행하였다. 고온고압 열수력 실험장치가 20% 정상상태 도달 후 Test Matrix에 따라 노심 가열봉 제어방식을 T-Control 또는 T+N Control 제어방식으로 전환하여 정상상태를 일정한 시간동안 유지시켰다. 그림 8과 9는 출력 증가율 1%/sec로 20% 출력에서 25% 출력으로 증가한 후 다시 감소시키는 실험결과를 보여주고 있다. 그림 8은 가열봉 히터 제어를 위

해 T+N Control 제어 방식을 사용한 결과(case : H-LP-R1-20-25-TN)인 반면 그림 9는 T-Control 제어를 수행한 결과(case : H-LP-R1-20-25-T)이다.

각 그림의 상부 그래프는 이차계통 주급수유량의 설정값, 측정값 및 주급수제어밸브의 개도를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 주급수 유량은 설정값의 증가/감소에 매우 잘 응답하는 특성을 보이며, 주급수유량의 제어를 위해 제어밸브가 열리는 과정을 보여주고 있다. 이때 사용된 주급수제어밸브의 PID값은 각각 0.5, 0.4, 0.1이며, 이 값은 주급수제어밸브의 제어를 최적화하기 위하여 선행실험을 통해 도출된 값으로 모든 실험 경우에 대해 동일한 값을 사용하였다.

각 그림의 중앙부 그래프는 이차계통 압력 설정값, 일·이차계통의 압력 측정값 및 주증기압력 제어밸브의 개도를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 주급수유량의 증가로 인하여 이차계통 압력이 증가한 후 제어밸브의 동작(열림)으로 인하여 다시 설정값인 35.5bar로 회복되는 과정을 볼 수 있다. 일차계통 압력은 약간 감소했다가 다시 회복되는 경향을 보여주는 데 T-Control 제어방식을 사용한 경우 압력의 감소폭이 약간 더 증가하는 경향을 보이며, 약간의 과잉응답 특성을 보여주고 있다. 주증기압력제어밸브의 경우 사용한 PID값은 각각 0.05, 0.49, 0.0이며 이 값은 주증기압력 제어밸브의 제어를 최적화하기 위하여 선행실험을 통해 도출된 값으로 모든 실험경우에 대해 동일한 값을 사용하였다.

각 그림의 하부 그래프는 일차측 노심 입구 온도, 출구 온도 및 가열봉 히터 제어용 출력값을 보여주고 있다. T+N Control 제어방식을 사용한 결과는 완만한 제어특성을 보이는 반면 T-Control일 경우에는 노심 출구온도의 과잉응답특성이 크게 나타나고, 제어용 출력값 역시 상대적으로 과잉 응답하는 특성을 보이고 있다. 노심출력 제어를 위해 사용한 PID값은 각각 0.6, 0.4, 0.0으로 모든 실험경우에 대해 동일한 값을 사용하였다. T+N Control의 경우 입력되는 열손실값은 20% 정상상태에서 측정된 값을 상수로 입력하여 동일하게 사용했으며 약 15kW 정도 된다. dead band는 SMART-P와 동일하게 1.0을 사용했으며, 지연시간(delay time)은 현재로서 고려하지 않았다. Dead band 1.0의 사용으로 인하여 가열봉 히터 제어용 출력은 노심출구 온도의 변화에 즉각적이고 연속적인 응답을 보이지 않는다. 즉, 허용 변화폭인 노심 출구온도 $\pm 3^{\circ}\text{C}$, 출력 $\pm 2\%$ 내부에서는 출력이 변경되지 않으며, 허용 변화폭을 넘어 설 경우 출력값의 변화를 유발하게 된다. 이러한 허용 변화폭의 존재로 인하여 노심 출력값은 이산적(discrete)으로 변하고 있음을 관찰할 수 있었다.

그림 10과 11은 출력 증가율 3%/sec로 20% 출력에서 25% 출력으로 증가한 후 다시 감소시키는 실험결과를 보여주고 있다. 전반적인 계통 응답특성은 1%/sec의 증가율의 실험결과와 유사하게 관찰되며 증가율 차이에 따른 효과는 보이지 않는다.

3.2 MCP 천이 운전

주냉각재펌프(MCP) 천이운전은 고온고압 열수력 실험장치를 기준 조건인 MCP 저속(900rpm) 운전모드에서 출력을 25%의 정상상태로 고정하여 수행하였다. 그림 12, 13, 14는 H-MCP-LM-R30-TN 경우의 실험결과를 보여주고 있다. 이 경우는 출력을 25%상태로 유지하고 노심 히터 가열봉은 T+N Control 제어방식으로 제어하면서 MCP의 회전속도를 저속(900rpm)에서 중속(1800rpm)으로 30rpm/sec의 증가율로 증가시킨 경우를 나타낸다. 그림 12는 일차냉각수의 유량을 보여주고 있는데, 중속(1800rpm)으로 펌프회전수가 증가함에 따라 유량이 증가하여 설정값을

잘 따라가고 있음을 보여주고 있다. MCP 제어를 위해 사용한 PID값은 각각 0.9, 2.0, 0.0이며, 동일한 값을 사용하였다. 그림 13은 이때의 노심 입·출구 온도 및 평균온도를 보여주고 있다. 일차냉각수 유량의 증가로 인하여 노심 입·출구 온도차 ΔT 가 줄어드는 반면 노심 평균온도는 증가하는 결과를 볼 수 있다. 그림 14는 이때의 일차측 압력을 보여주는 데 초기에 노심출구온도의 감소로 인하여 순간적으로 압력이 감소했다가, 이 후 노심 평균온도의 증가로 인하여 압력이 증가하는 경향을 보여준다. 시간이 지남에 따라 노심 출구 온도가 계속 증가하여 T+N Control의 허용변화폭(dead band)을 벗어나면 노심 출력이 약간 줄어들게 된다. 이러한 출력의 감소는 노심 출구온도 및 노심 평균온도의 감소를 유발하며, 이는 다시 일차측 압력의 감소로 이어지게 된다.

그림 15, 16, 17은 H-MCP-LN-R30-TN 경우의 실험결과를 보여주고 있다. 이 경우는 출력을 25%상태로 유지하고 노심 히터 가열봉은 T+N Control 제어방식으로 제어하면서 MCP의 회전속도를 저속(900rpm)에서 자연순환(0rpm)으로 30rpm/sec의 감소율로 감소시킨 경우를 나타낸다. 그림 15는 일차냉각수의 유량을 보여주고 있는데, 펌프회전수의 감소에 따라 유량이 감소하여 자연순환 유량에 도달한 결과를 보여주고 있다. 자연순환 유량은 약 14% 정도가 되는 것으로 측정되었다. 그림 16은 이때의 노심 입·출구 온도 및 평균온도를 보여주고 있다. 일차냉각수 유량의 감소로 인하여 노심 입·출구 온도차 ΔT 는 증가하는 반면 노심 평균온도는 감소하는 결과를 보여주고 있다. 그림 17은 이때의 일차측 압력을 보여주는 데 초기에 노심출구온도의 증가로 인하여 순간적으로 압력이 증가했다가, 이 후 노심 평균온도의 감소로 인하여 압력이 감소하고 있는 경향을 보여준다. 시간이 지남에 따라 노심 출구 온도가 계속 감소하여 T+N Control의 허용변화폭(dead band)을 벗어나면 노심 출력이 약간 증가하게 된다. 이러한 출력의 증가는 노심 출구온도 및 노심 평균온도의 증가를 유발하며, 이는 다시 일차측 압력의 증가로 이어지게 된다.

그림 18, 19, 20, 21은 H-MCP-LN-R30-T 경우의 실험결과를 보여주고 있다. 이 경우는 출력을 25%상태로 유지하고 노심 히터 가열봉은 T Control 제어방식으로 제어하면서 MCP의 회전속도를 저속(900rpm)에서 자연순환(0rpm)으로 30rpm/sec의 감소율로 감소시킨 경우를 나타낸다. 그림 18은 일차냉각수의 유량을 보여주고 있는데, 펌프회전수의 감소에 따라 유량이 감소하다가 정상상태의 자연순환 유량에 도달하지 못하고 진동하는 결과를 보여주고 있다. 그림 19는 이때의 노심 입·출구 온도 및 평균온도를 보여주고 있다. 일차냉각수 유량의 감소로 인하여 노심 입·출구 온도차 ΔT 는 증가하고, 노심 평균온도가 감소하다가 진동이 시작된다. 그림 20은 이때의 일차측 압력을 보여주는 데 압력 역시 노심 온도와 동일하게 진동하는 경향을 보여주고 있다. 그림 21은 이때의 노심 가열봉의 출력을 보여주고 있다. T-Control 제어 방식을 사용할 경우 노심출구 온도의 변화에 따라 노심의 출력이 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있다. 이는 일차측 유량이 작을 경우 노심 출구온도의 시상수(time constant)가 크므로, T-Control 제어방식으로는 자연순환 운전모드로 천이 운전하는 것이 불가능하다는 결과를 보여준다.

4. 결론 및 요약

고온고압 열수력 실험장치(VISTA)를 이용하여 출력변동 및 주냉각재펌프의 운전모드 변환에 대한 검증 실험을 수행하였다. 출력변동 운전은 노심 출력 20%에서 25%로 1%/sec 및 3%/sec의 증감률로 출력변동에 따른 일·이차계통의 동특성을 고찰하였으며, 이때 노심 가열봉의 제어방식은 T-Control 제어 또는 T+N Control 제어를 사용하여 동특성 결과를 비교 고찰하였다. 노심 가

열봉을 T+N Control로 할 경우 T-Control 제어를 할 경우에 비하여 계통변수의 과잉응답특성이 줄어드는 경향을 보이나, 허용변화폭(dead band)의 존재로 인하여 이산적인 출력값의 변화를 보이는 결과를 얻었다. 본 연구에서 고려한 출력증감률의 차이에 따른 계통 동특성의 차이는 관찰되지 않았다.

노심 출력을 25%로 유지한 상태에서 저속운전(900rpm)에서 중속운전 또는 자연순환모드로 변화시키는 주냉각재펌프 천이운전 실험을 수행하였다. MCP 천이 운전의 경우 일차냉각재의 노심 입출구 온도차와 평균온도의 변화로 인하여 일차측 압력이 초기에 약간 요동하는 결과를 보이지만 T+N Control 제어방식을 사용할 경우 시간이 지남에 따라 정상상태에 잘 도달하는 결과를 얻었다. 출력 25%에서 자연순환운전으로 천이 운전할 경우 안정적인 자연순환 유량은 약 14% 정도가 되는 결과를 얻었다. 그러나 노심 가열봉을 T-Control 제어방식으로 사용할 경우 자연순환으로 천이하는 동안 일차측 온도 및 압력이 발산하는 결과가 얻어진다. 그러므로 MCP 저속운전일 경우 노심 가열봉의 제어방식은 T+N 제어방식을 사용해야 한다는 결론을 얻었다.

참고 문헌

- [1] 이성재 외, “고온고압 열수력 실험장치의 기본설계,” KAERI 내부문서, 2001.
- [2] 최기용 외, “출력변동에 따른 고온고압 열수력 실험장치(VISTA) 동특성 검증 실험 보고서,” KAERI/TR-2605/2003, 2003.
- [3] 최기용 외, “고온고압 열수력 실험장치(VISTA) 주요 열수력 기기 특성 및 성능해석 보고서,” KAERI/TR-2606/2003, 2003.
- [4] 최기용 외, “고온고압 열수력 실험장치(VISTA)의 출력변동 동특성에 관한 실험적 연구,” 2003 춘계원자력학술대회, 2003.
- [5] 박현식 외, “정상상태에서의 고온고압 열수력 실험장치(VISTA)의 열수력 특성 분석 보고서,” KAERI/TR-2657/2004, 2004.
- [6] 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.
- [7] 장문희 외, “일체형원자로(SMART) 기본설계 보고서,” KAERI/TR-2142/2002, 2002.
- [8] 이규형 외, “SMART 기본설계 성능평가,” KAERI/TR-2171/2002, 2002.
- [9] 양수형 외, “SMART 기본설계 안전성 평가,” KAERI/TR-2173/2002, 2002.
- [10] 유승엽 외, “Development of Normal Power Control Logics for the SMART,” 2001 춘계원자력학술대회, 2001.
- [11] 유승엽 외, “SMART-P MCP 천이운전전략 개발,” 2003 춘계원자력학술대회, 2003.

표 1. 고온고압 열수력 실험장치의 제어기기 목록

제어기기	공정변수	설정값	제어신호
가열봉 (Group 1,2,3)	T-Control - 노심출구 온도 (T_{hot})	User input (eg. 310 °C)	Heater power
	T+N Control 1) 노심출구온도(T_{hot}) 2) 가열봉 출력 (N)	User input, Heat loss	
MCP	일차계통 유량	User input (eg. 1800rpm)	MCP speed
주급수제어 밸브1, 2	주급수 유량	User input (eg. 25%)	Valve position
주증기압제어 밸브	주증기 압력	User input (eg. 35.5 bar)	Valve position
FWST 내부 히터	주급수 온도	User input (eg. 40 ~70 °C)	Heater power
보충수펌프	주급수공급탱크 압력	User input (eg. 35 bar)	MWP speed

표 2. 고온고압 열수력 시험 Test Matrix

#	Test ID	실험 내용
1	H-LP-R1-20-25-T	저속출력운전(Low Power, 20~25%) - MCP 저속(25% 유량) - Heater control ; T, 가열율: 1% - 초기출력: 20%, 도달출력: 25%
2	H-LP-R1-20-25-TN	저속출력운전(Low Power, 20~25%) - MCP 저속(25% 유량) - Heater control ; T+N, 가열율: 1% - 초기출력: 20%, 도달출력: 25%
3	H-LP-R3-20-25-T	저속출력운전(Low Power, 20~25%) - MCP 저속(25% 유량) - Heater control ; T, 가열율: 3% - 초기출력: 20%, 도달출력: 25%
4	H-LP-R3-20-25-TN	저속출력운전(Low Power, 20~25%) - MCP 저속(25% 유량) - Heater control ; T+N, 가열율: 3% - 초기출력: 20%, 도달출력: 25%
5	H-MCP-LM-R30-TN	MCP 속도전환 운전(Low $\Rightarrow$ Mid), @25% power - Heater control ; T+N - 변화율 30rpm/sec
6	H-MCP-ML-R30-TN	MCP 속도전환 운전(Mid $\Rightarrow$ Low), @25% power - Heater control ; T+N - 변화율 30rpm/sec
7	H-MCP-LN-R30-TN	MCP 속도전환 운전(Low $\Rightarrow$ 자연순환), @25% power - Heater control ; T+N - 변화율 30rpm/sec
8	H-MCP-NL-R30-TN	MCP 속도전환 운전(자연순환 $\Rightarrow$ Low), @25% power - Heater control ; T+N - 변화율 30rpm/sec
9	H-MCP-LN-R30-T	MCP 속도전환 운전(Low $\Rightarrow$ 자연순환), @25% power - Heater control ; T - 변화율 30rpm/sec

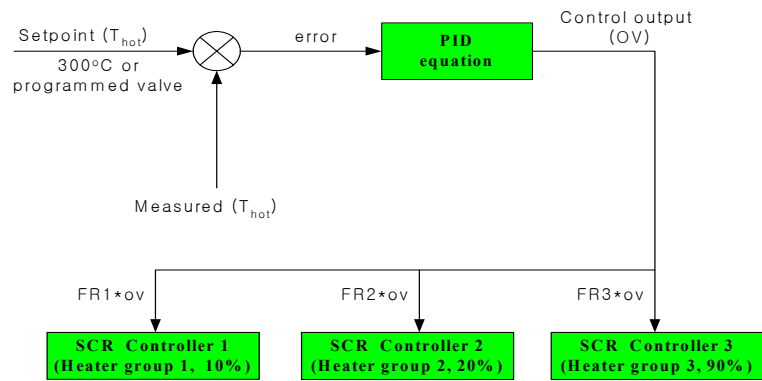


그림 1. 노심 가열봉 히터의 제어로직 구성도 (T-Control)

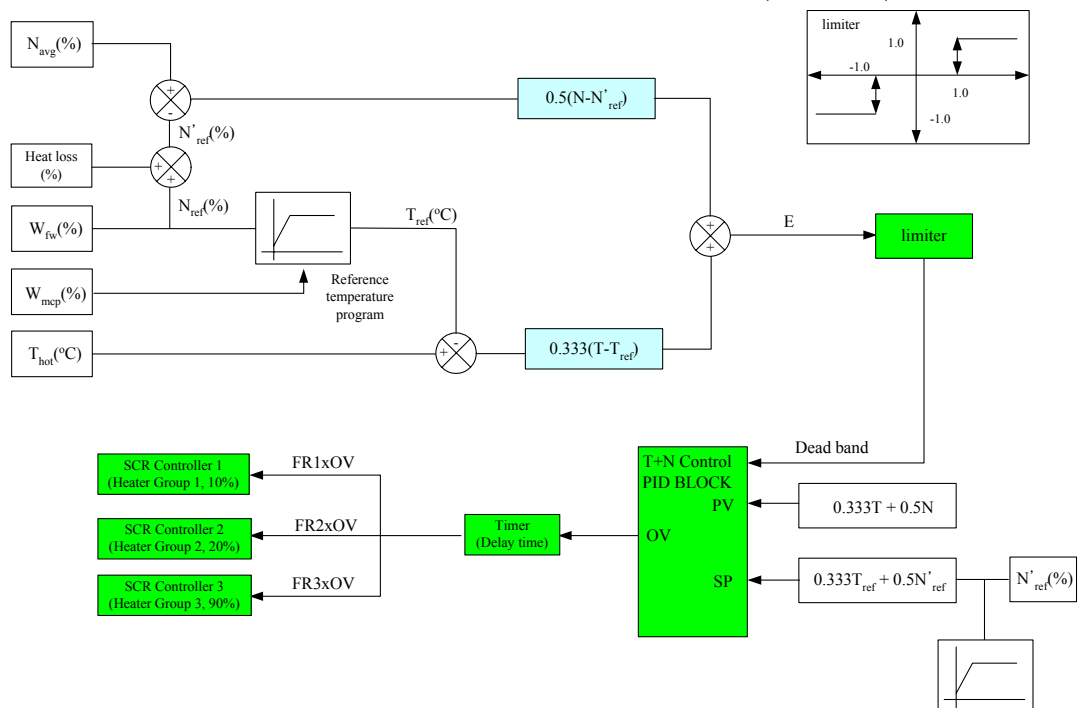


그림 2. 노심 가열봉 히터의 제어로직 구성도 (T+N Control)

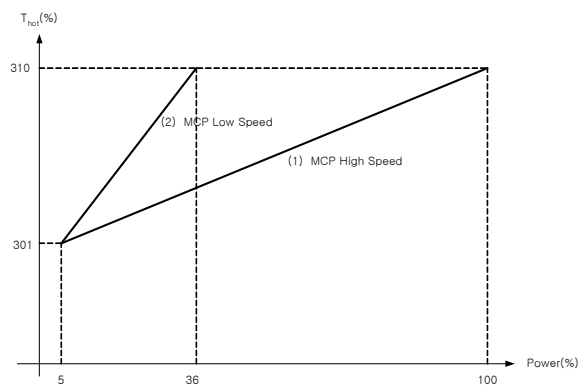


그림 3. 참조 출력-온도 프로그램

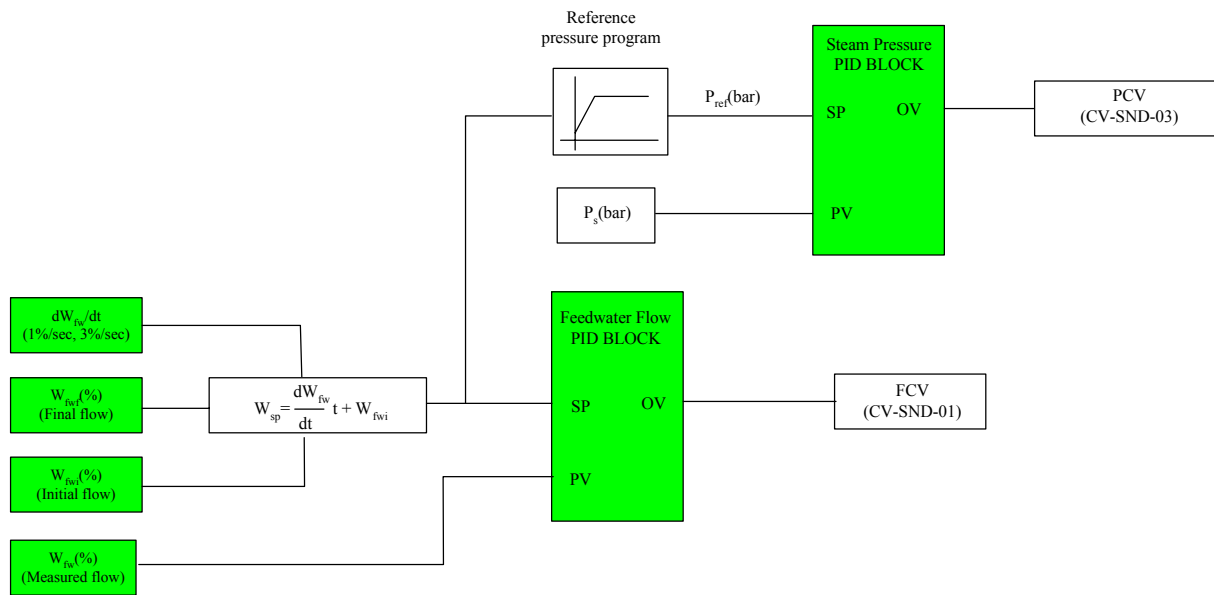


그림 4. 출력 증감 운전 제어 블록 구성도

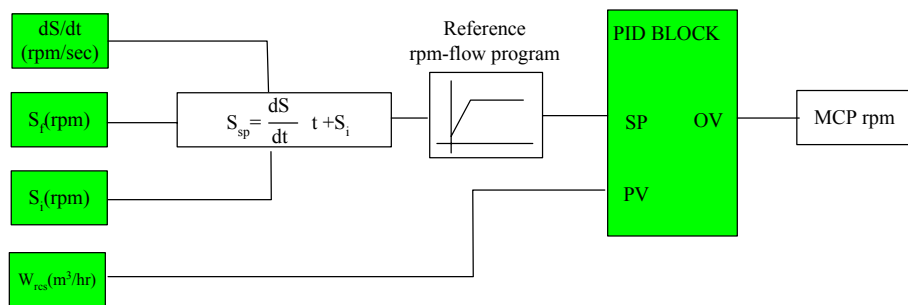


그림 6. 주냉각재펌프 회전속도 증감 제어 운전 블록 구성도

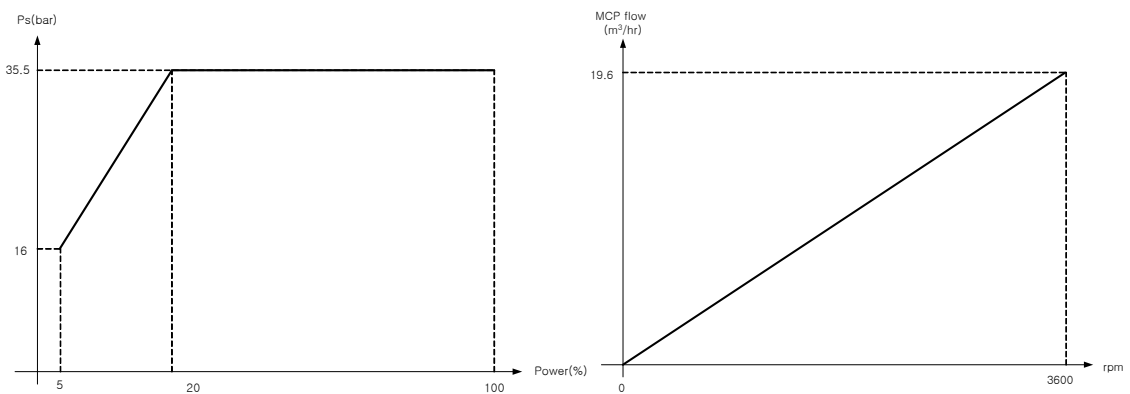


그림 5. 참조 출력-주증기압력 프로그램

그림 7. 참조 MCP 회전속도-유량 프로그램

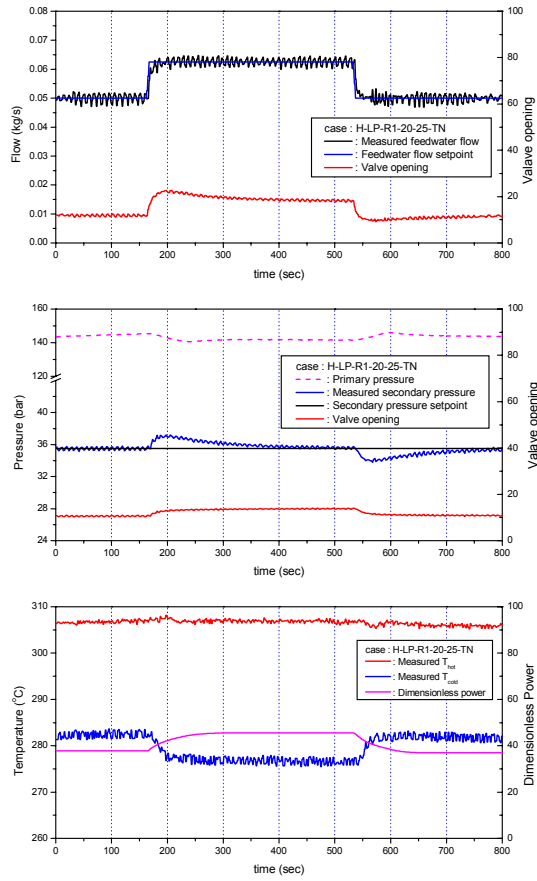


그림 8. 출력 증/감소 운전
(case : H-LP-R1-20-25-TN)

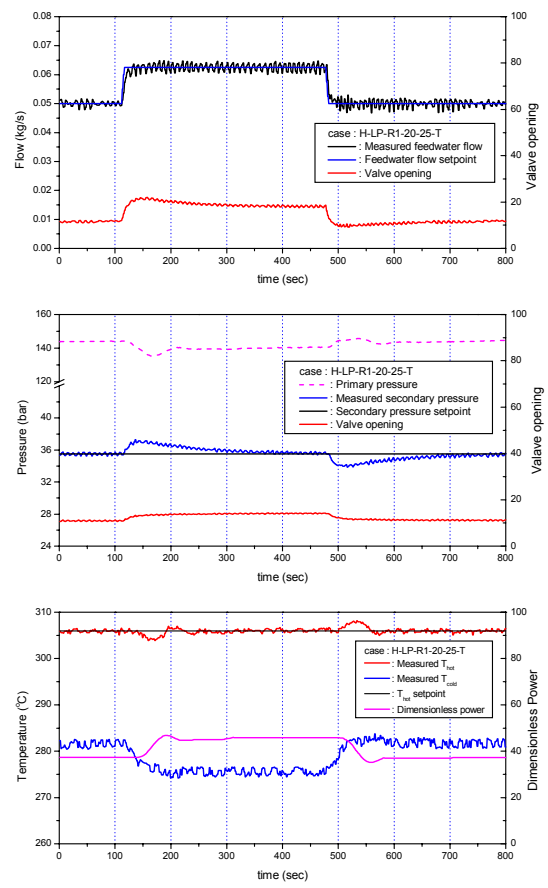


그림 9. 출력 증/감소 운전
(case : H-LP-R1-20-25-T)

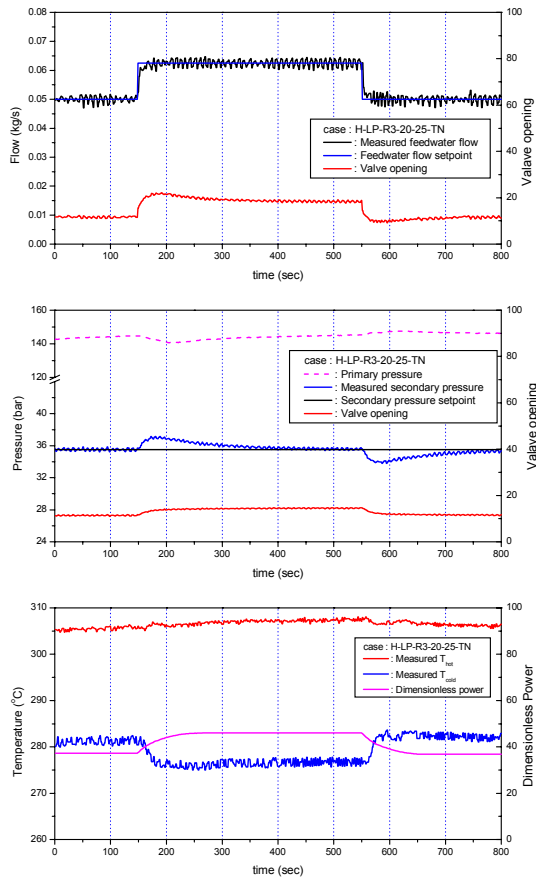


그림 10. 출력 증/감소 운전
(case : H-LP-R3-20-25-TN)

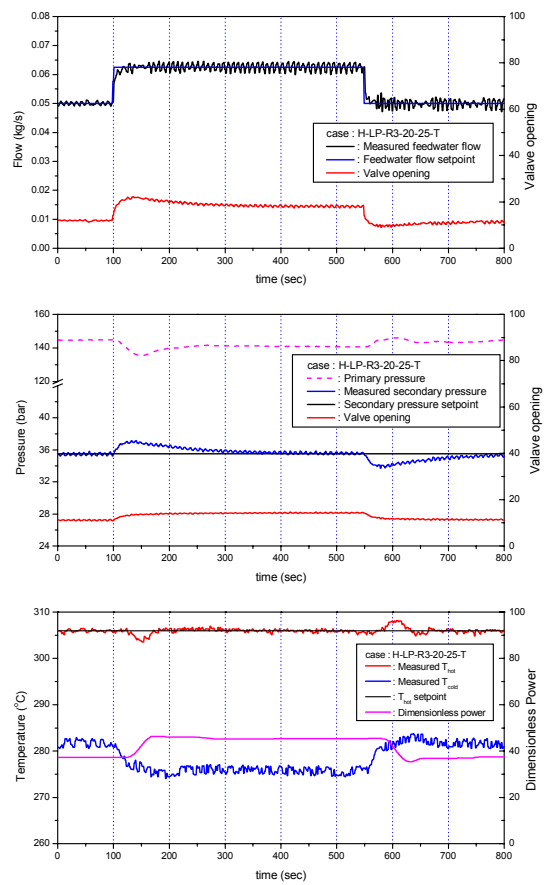


그림 11. 출력 증/감소 운전
(case : H-LP-R3-20-25-T)

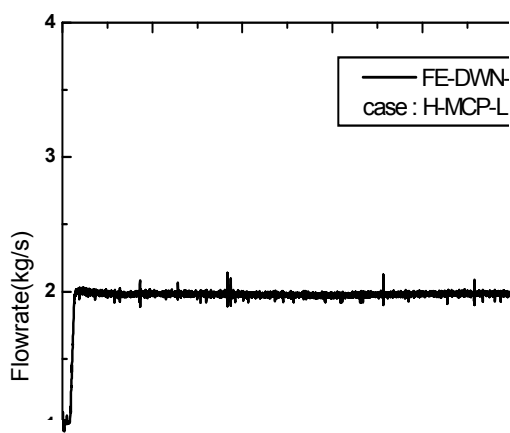


그림 12. MCP 천이 운전시 일차유량
(case : H-MCP-LM-R30-TN)

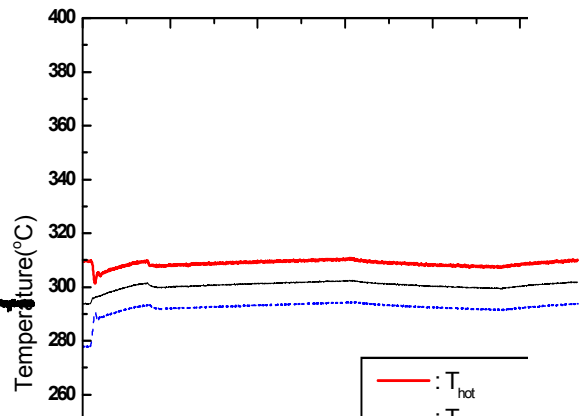


그림 13. MCP 천이 운전시 일차측 온도
(case : H-MCP-LM-R30-TN)

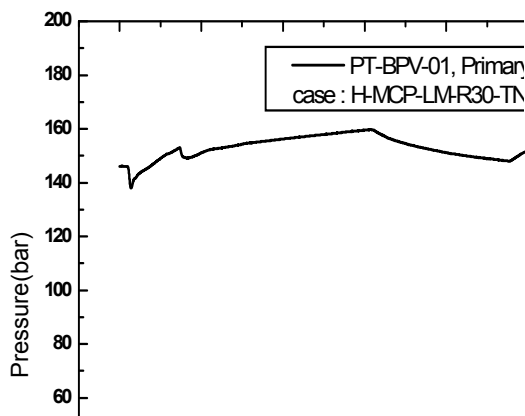


그림 14. MCP 천이 운전시 일차측 압력
(case : H-MCP-LM-R30-TN)

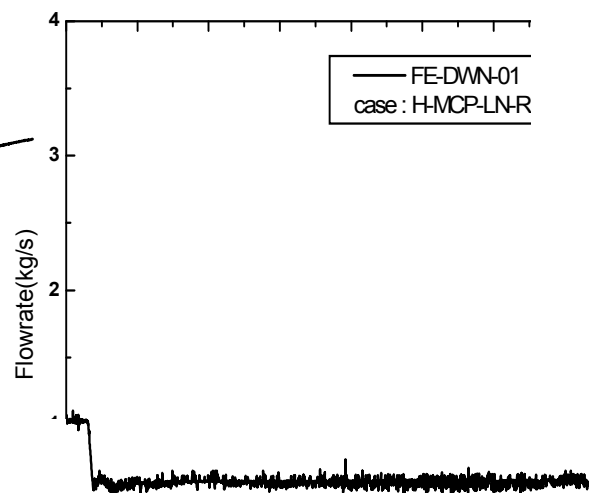


그림 15. MCP 천이 운전시 일차유량
(case : H-MCP-LN-R30-TN)

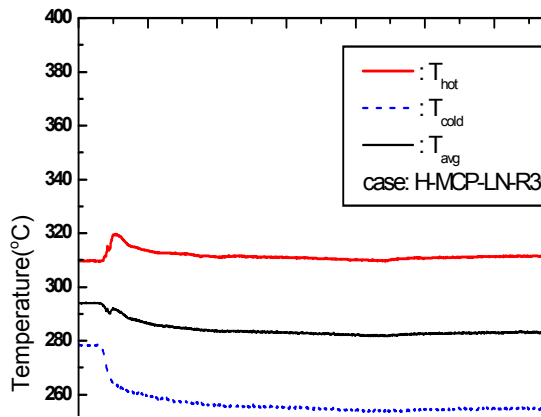


그림 16. MCP 천이 운전시 일차측 온도
(case : H-MCP-LN-R30-TN)

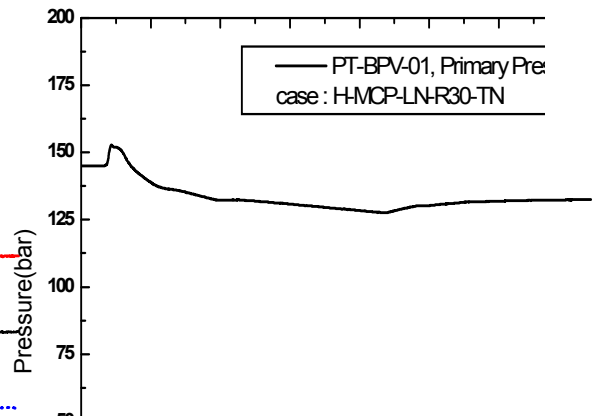


그림 17. MCP 천이 운전시 일차측 압력
(case : H-MCP-LN-R30-TN)

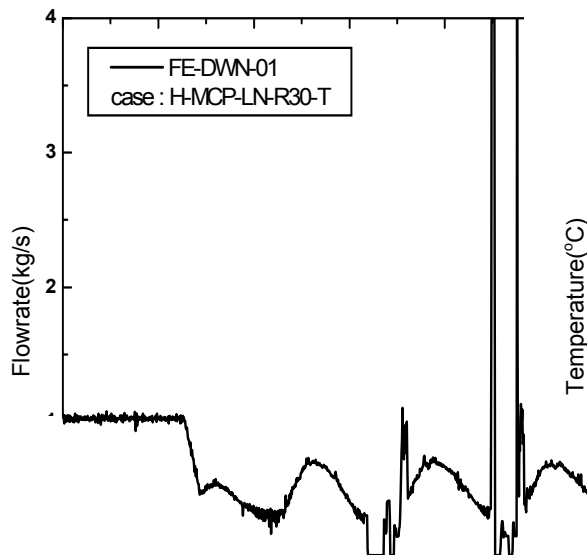


그림 18. MCP 천이 운전시 일차유량
(case : H-MCP-LN-R30-T)

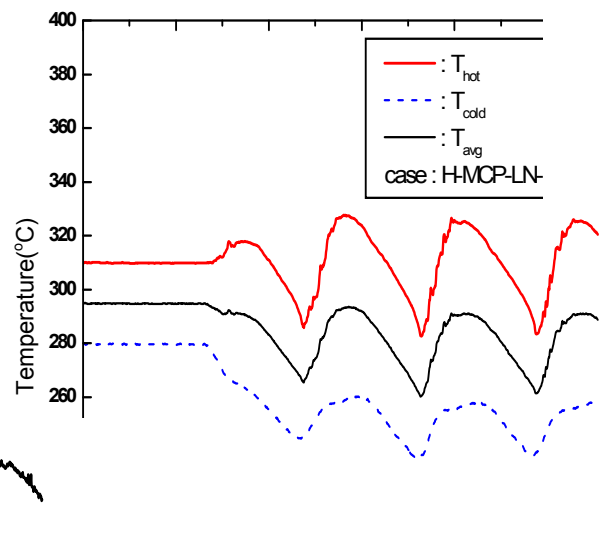


그림 19. MCP 천이 운전시 일차측 온도
(case : H-MCP-LN-R30-T)

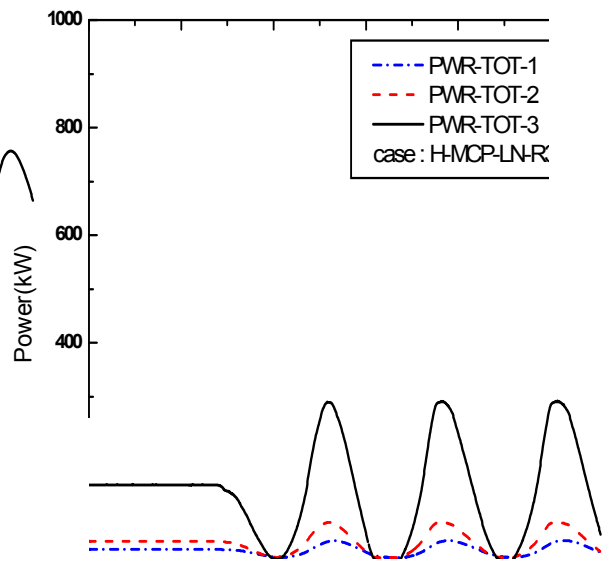
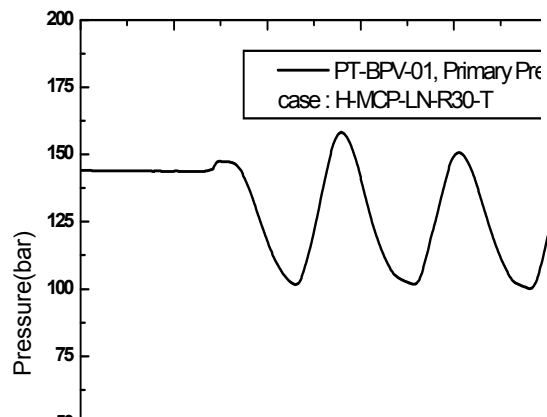


그림 20. MCP 천이 운전시 일차측 압력
(case : H-MCP-LN-R30-T)

그림 21. MCP 천이 운전시 노심 가열봉 출력
(case : H-MCP-LN-R30-T)