

## SMART 기동운전에 대한 성능평가

### Performance Assessment of SMART Startup Operation

이성욱, 임홍식, 김희철

동력로기술개발팀  
한국원자력연구소  
대전시 유성구 덕진동 150

#### 요약

SMART는 일체형 원자로로 주냉각재펌프가 원자로용기 내에 위치해 있으므로 기존 상용로와 같이 주냉각재펌프의 가동에 의한 원자로가열이 불가능하여 새로운 기동운전 전략이 필요하다. 따라서 기동운전을 핵적기동운전, 원자로가열운전, 원자로기동운전으로 구분하여 각 운전단계별로 다른 제어논리를 적용하는 운전전략을 채택하였다. 이 기동운전 전략이 각 운전단계별로 토의되었고 실제 TASS/SMR 코드를 이용하여 SMART에 적용되었을 때 그 논리의 타당성 및 적합성이 평가되었다. 평가결과 SMART 기동운전을 위한 운전전략에 따라 SMART 계통은 운전허용기준 내에서 요구되는 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

#### Abstract

Main circulation pumps (MCP) are contained within reactor vessel in SMART, which makes it impossible to heatup the coolant with MCP heating that used in the conventional loop-type nuclear power plant. This situation leads to a invention of new strategy for SMART start-up operation. The start-up operation of SMART consists of nuclear start-up, reactor heat-up, and reactor start-up. Each operation step has its own control concept and logic. The strategy for startup operation has been discussed and analyzed with the TASS/SMR code for SMART. The analysis results have shown that the SMART system behavior is in acceptable operation range with required performance when the strategy for SMART start-up operation is applied.

#### 1. 서론

중장기 원자력 연구개발사업의 신형원자로 기술개발과제에서 개발중인 SMART(System-Integrated Modular Advanced Reactor)[1]는 원자력에너지의 활용범위를 전력생산 이외에도 해수담수

화, 열병합로 등으로 다변화하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 기존의 대형 분리형 원자로가 아닌 일체형의 개념을 가지고 있으며 안전성의 획기적인 향상을 위해 고유 및 피동안전개념들이 도입되어 있다. SMART는 기존의 상용 원자로와는 그 개념부터 상이하며 일체형이라는 특성상 대형의 주냉각재펌프를 채택할 수가 없으므로, 원자로의 기동에 있어서 주냉각재펌프를 이용한 냉각재 가열방식이 가능하지 않다. 따라서 SMART를 위한 기동운전 전략[2]이 새로이 개발되어야 했으며 간략히 살펴보면 다음과 같다.

SMART에서 냉각재의 온도를 높일 수 있는 거의 유일한 방법은 노심 출력을 이용하는 것이다. 그런데 노심에서 출력이 생산되려면 원자로가 임계상태이어야 하므로 SMART 기동운전을 위해 가장 선행되어야 할 단계는 미임계 상온상태의 원자로를 임계상태로 만드는 것이다. 이를 “핵적기동운전”이라 한다. 다음 단계는 임계상태의 원자로에서 노심 열출력에 의해 냉각재를 가열하는 “원자로가열운전”으로 SMART 기동운전의 가장 중요한 부분이라 할 수 있다. 세 번째 단계는 원자로가열운전에 의해 냉각재의 온도가 정상운전이 가능한 수준에 도달하면 원자로출력을 터빈 기동이 가능한 20% 출력까지 상승시키는 “원자로기동운전”이다. 이 세 단계의 운전을 통칭하여 “SMART 기동운전”이라 한다.

본 연구에서는 SMART 기동운전을 각 단계별로 제어논리와 함께 살펴보고 현재 기본설계단계에 있는 SMART의 설계에 실제로 적용하여 계통열수력해석코드를 이용해 그 성능을 살펴보았다. 이를 통해 SMART 기동운전 전략의 타당성 및 적합성을 평가하였다.

## 2. SMART 기동운전 전략

SMART 기동운전을 위한 전략은, 원자로 및 계통 전반의 상태에 따라 운전단계를 구분하여 그 상황에 적합한 출력제어논리 및 허용기준을 이용하여 운전하는 것으로 이에 따라 기동운전의 단계를 “핵적기동운전”, “원자로가열운전”, 그리고 “원자로기동운전”의 세 단계로 나누었다. 각 운전단계를 자세히 살펴보면 다음과 같다.

### 가. 핵적기동운전

핵적기동운전은 미임계의 원자로를 임계상태로 보내는 운전과정을 의미하며 냉각재의 온도에 따라 저온핵적기동운전과 고온핵적기동운전으로 나눌 수 있다. 저온핵적기동운전은 원자로를 최초로 기동할 때라든가 오랜 기간 정지상태에 있다가 재기동할 때 등 냉각재의 온도가 상온일 때부터 시작되는 운전인 반면 고온핵적기동운전은 정상운전중인 원자로가 어떤 이유로 해서 냉각재의 온도는 고온이지만 미임계상태가 되었을 때 다시 원자로를 임계상태로 만들기 위한 운전이다. 기본적으로 두 운전은 동일하므로 저온핵적기동운전만을 다룬다.

핵적기동운전에서 출력제어논리는 그림 1에 도시되어 있으며 출력증배계수를 이용하는 제어논

리이다. 출력증배계수란 출력이 두 배가 되는 시간을 의미하며 핵적기동운전에서는 이를 40초 부근으로 유지하며 노심출력을 증가시키는 것을 기본으로 한다. 초기 영출력상태에서 제어봉 인출을 시작하면 노심 출력이 발생하기 시작하는데 출력증배계수를 측정하여 40초에 2초의 dead band를 두고 출력을 제어한다. 즉 출력증배계수가 38초 이하이면 제어봉의 인출을 멈추고 42초 이상이면 제어봉을 인출한다. 이때 목표 출력을 설정하여 노심 출력이 목표출력에 도달하면 제어봉의 인출을 멈추고 계통을 안정화시킨다. 본 해석에서는 목표출력을 0.1%로 하였다. 핵적기동운전동안 표 1에 정리되어 있는 원자로 경보 및 정지신호가 발생하지 않아야 한다.

#### 나. 원자로가열운전

원자로가열운전은 핵적기동운전을 통해 임계상태에 도달해 있는 원자로의 냉각재 온도를 운전 가능수준까지 가열하기 위한 운전이다. 일체형 원자로인 SMART는 주냉각재펌프가 원자로용기내에 위치해 있으므로 그 용량이 크지 않다. 따라서 주냉각재펌프에 의한 냉각재 가열이 거의 불가능하므로 다른 전략을 택하게 되었다. 즉 노심의 출력을 높여 이로 인해 발생하는 열을 이용하여 냉각재의 온도를 높이는 것이다. 이를 위한 출력제어논리가 그림 2에 나타나있다. 제어논리에 의해 출력을 설정하면 실제 원자로에서 출력이 발생하고 그 일부는, 주급수 유량이 정격유량의 5%를 유지하고 있는 이차측으로 전달되고 나머지는 냉각재의 가열에 이용된다. 이에 따라 냉각재의 온도가 상승하고 일정온도 이상이 되면 이차측에서는 증기가 발생하게 된다. 이차측 유동조건이 이상(Two-phase)으로 바뀌면 이차측으로부터 제거되는 열이 급속히 늘어난다. 일차측의 입장에서 보면 냉각재 가열에 쓰이는 열이 줄어들게 되어 냉각재의 지속적인 가열이 어렵게 될 수도 있다. 이를 보상하기 위해 이차측의 조건이 일정한 수준에 도달하면(본 해석에서는 증기 압력 1.6MPa) 출력의 설정값을 높은 값으로 바꾸어 일정한 가열율을 유지하도록 한다. 이를 다단계 출력설정에 의한 원자로가열운전 출력제어논리라 한다. 이때 각 단계에서의 설정출력은 시행착오를 거쳐 구해내게 된다. 본 해석에서는 각각 2.5%와 7.5%로 하였다.

냉각재의 온도가 상승하여 목표값(본 해석에서는 293℃)에 도달하면 제어봉의 구동을 멈추고 계통을 안정화시킨다. 이때 출력은 일차측과 이차측간의 열균형에 의해 정격출력의 5% 근방에서 안정화된다. 원자로가열운전에서의 운전허용기준은 표 1에서 보듯이 출력이 40% 이하로 유지되어야 한다는 것이다.

#### 다. 원자로기동운전

원자로기동운전은 원자로가열운전에 의해 고온의 5% 출력상태에 있는 원자로계통을, 주터빈을 기동할 수 있는 20% 출력수준까지 높이는 운전으로 기본 개념은 출력운전과 동일하다.

무봉산 노심인 SMART는 큰 감속재 온도계수를 가지므로, 냉각재 온도의 변화에 따라 노심출

력이 상당히 변한다. SMART에서는 이러한 원리를 이용하여 주급수 유량 변화에 의한 출력제어 방식을 택하고 있다. 물론 급수유량 변화만으로는 원자로 출력을 요구되는 속도로 제어하기 어려우므로 제어봉에 의한 반응도 보상도 필요하다.

원자로기동운전에서는 주냉각재펌프 저속운전으로 인한 과도한 출력 변화를 제어하기 위해 그림 3에 도시되어 있는 T/N 제어를 이용하여 출력을 제어한다. T/N 제어는 일차측 증기발생기 입구 온도 기준프로그램에 의해 출력과 온도를 다음 식에 의해 제어하는 제어방식이다.

$$U=0.333 \Delta T+0.5 \Delta N$$

여기서  $\Delta N = N - Q_w$ 로 중성자 출력(N)과 주급수 유량( $Q_w$ )의 편차이고,  $\Delta T = T_{hot} - T_{ref}$ 로 일차측 증기발생기 입구 온도( $T_{hot}$ )와 기준 온도( $T_{ref}$ ) 프로그램의 편차이다. 제어봉은  $|U|>1$  일 때 이동하여,  $|U|=0$  일 때 정지하는 이력 특성을 가지게 된다. 각 계수들은 dead band를 의미한다. 즉 온도는 3℃, 출력은 2%의 dead band를 가진다.

원자로기동운전동안 주급수 유량의 변화율을 분당 5%로 하여 출력을 10%로 상승시켰다가 다시 20%까지 단계적으로 상승시킨다. SMART 기동운전동안 4개의 증기발생기 섹션 중 1개만 개방하고 운전을 하는데 나머지 3개의 개방이 이 원자로기동운전기간동안에 이루어진다. 이는 병렬 배관계통에서 저유량시 발생할 수 있는 유동 불안정성을 피하기 위한 것으로, 10% 출력에서 1개를 개방하고 20% 출력에서 나머지 2개를 개방하는 방식을 취한다. 원자로기동운전동안 표 1에 나타나있는 주냉각재펌프 저속운전시의 정보 및 원자로 정지설정치를 초과해서는 안된다.

### 3. SMART 기동운전 해석

SMART 기동운전을 위한 전략을 SMART에 적용하고 그 결과를 계통열수력해석코드를 이용하여 평가하였다. 해석에 사용된 코드는 KAERI에서 SMART의 성능 및 안전 해석을 위하여 개발 중인 TASS/SMR(Transient And Setpoint Simulation/Small and Medium Reactor) 코드[3]이다. SMART 기동운전 전략 평가를 위한 SMART Nodalization을 그림 4에 나타내었는데, 일차 및 이차 계통을 각각 122개의 노드와 135개의 유로로써 모사하고 있다.

#### 가. 초기조건 및 해석방법

SMART 기동운전 해석을 위한 초기조건은 표 2에 정리되어 있듯이 상온 미압계 정지상태(4.5MPa, 20℃)이며, 이때 출력은 10<sup>-7</sup>%, 주냉각재펌프 4기는 모두 저속(정격속도의 25%)으로 회전하고 있다. 가압기의 중앙공동, 중간공동, 그리고 환형공동의 일부에 비응축가스(N<sub>2</sub>)가 채워져 있다. 이차측에는 4개의 증기발생기 섹션중 1개만 개방하여 운전하며 정격유량의 5%에 해당하는 주급수가 상온상태에서 흐르고 있다. 이 상태를 출발점으로 핵적기동, 원자로가열, 및 원자로기동운전을 차례로 거쳐 최종적으로 출력 20% 상태까지 TASS/SMR 코드를 이용하여 해석함에 있어

각 운전단계에서 운전허용기준 만족 여부와 운전전략 및 제어논리의 타당성 여부를 평가한다.

#### 나. 해석결과 및 토의

그림 5에 SMART 기동운전 전반에 걸친 출력의 변화를 도시하였다. 처음부터 4000초까지는 핵적기동운전, 4000초에서 16000초까지는 원자로가열운전, 그 이후는 원자로기동운전이다. 핵적기동운전에서의 출력변화는 다른 운전단계에 비해 아주 작으므로 따로 도시하였다. 초기 영출력 상태에서 핵적기동운전 기간동안 출력증배계수 제어논리에 의해 출력이 증가하여 0.1% 부근까지 상승하는 것을 볼 수 있다. 그림 6에는 핵적기동운전 기간동안의 출력증배계수의 변화가 나타나있다. 초기에 출력이 상승할 때 출력증배계수가 서서히 감소하다가, 어느순간 급격히 감소하여 최소 28초까지 줄어든다. 이후 다시 증가하여 안정화되는 것을 확인할 수 있다. 핵적기동운전중 노심출력이 매우 낮아 냉각재 및 핵연료 온도변화가 거의 없으므로 반응도 궤환의 영향 없이 제어봉만으로 출력이 제어된다. 핵적기동운전동안 최대출력은 0.16%로 운전허용범위내에 있다.

핵적기동운전이 완료되면 이어서 원자로가열운전이 시작되는데 이 운전은 전체 SMART 기동운전중 절반 이상의 시간을 차지하며 가장 핵심이 되는 운전이다. 특히 가열운전중 냉각재 및 핵연료 온도 변화가 커서 FTC, MTC에 의한 반응도 궤환이 출력 상승을 억제하고, 이차측에서 증기가 생성되는 시점 이후에는 열제거율이 커져서 이러한 모든 효과를 보상하기 위해 제어봉에 의한 출력제어에 크게 의존한다. 그림 5에서 보듯이 설정된 출력 부근에서 실제 출력이 진동하는 것을 볼 수 있다. 그림 7에는 SMART 기동운전 전반에 걸쳐 냉각재의 온도변화가 나타나있는데, 가열운전시에 가장 큰 변화를 겪는 것을 알 수 있다. 초기 상온에서 가열운전 완료시점에서는 291℃까지 상승하였다. 약 10000초 부근에서 냉각재의 가열율이 바뀌는데 이는 이 시점에서 이차측 증기의 압력이 1.6MPa 이상이 되어 출력설정치가 바뀌었기 때문이다. 원자로가열운전에서는 약 80℃/시간의 가열율을 보인다. 그림 8의 압력변화 역시 가열운전시에 가장 큰 폭으로 상승함을 알 수 있다. 이는 냉각재 온도 상승으로 인한 부피의 팽창때문이다. 이 기간동안 비응축성 기체로 가득차있던 가압기 계통으로 냉각재가 유입되어 가열운전이 완료되는 시점에서는 중앙공동까지 냉각재가 차오르게 된다. 이 거동이 그림 9에 나타나있다. 원자로가열운전은 계통에 아주 큰 과도를 유발하는 운전으로 이 기간동안 일차계통의 온도 및 압력이 정상운전범위까지 상승하며, 이차측에서 증기의 생성이 시작된다. 그림 10에 이차측의 개방된 증기발생기 섹션 출구에서의 기공율 변화를 나타내었다.

원자로가열운전이 완료되면 원자로기동운전이 시작되는데 먼저 주급수 유량을 분당 5%로 정격 유량의 10%까지 상승시킨다. 그러면 그림 5에서 보듯이 출력이 이에 따라 상승함을 볼 수 있다. 주급수 유량의 증가가 멈추어도 출력은 overshoot되어 최대 16.4%까지 상승하였다가 몇 번의 진동을 거쳐 안정화된다. 다시 주급수 유량을 20%로 증가시키면 출력은 유사한 거동을 나타내며 최종적으로 23.7%에서 안정화된다. 이 시기에는 T/N 제어기를 통해 출력이 제어된다. 그림 7의 냉

각재 온도 변화에서 원자로기동운전부분을 확대해서 그린 부분을 살펴보면 계통의 온도는 기준온도보다 조금 낮은 상태에서 운전이 시작됨을 알 수 있다. 따라서 온도를 기준온도로 상승시키기 위해 제어봉이 지속적으로 인출되고 이로 인해 초기 출력이 비교적 높은 값까지 overshoot된다. 이후 일차측 증기발생기 출구온도는 기준온도보다 조금 낮은 값을 가지고 정상상태에 도달하는데 이는 기준출력보다 조금 높은 실제출력을 보상하기 위해서이다. 이 기간동안 압력은 냉각재 온도 변화로 인한 평균체적변화에 의존하며 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 원자로기동운전에서의 중요한 운전과정중의 하나가 차단되어 있던 증기발생기 섹션을 개방하는 것인데 이는 이차측에 과도를 유발하여 계통의 거동에 영향을 줄 수가 있다. 이 운전으로 인해 가장 영향을 받는 것은 증기 과열도인데 그림 11과 같은 주급수 유량의 변화와 맞물려 그림 12와 같은 거동을 보인다. 주급수 유량의 증가로 증기과열도는 떨어졌다가 다른 증기발생기 섹션을 개방함에 따라 증기과열도가 다시 높아진다. 이는 주급수 유량 증가시 일차측으로부터의 열의 상당부분이 증발잠열로 흡수되어 증기 온도가 낮아지기 때문이다. 최종적으로는 40℃ 이상의 과열도를 가진 증기가 생성된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 SMART 기동운전을 위한 운전전략에 대해 살펴보고, TASS/SMR 코드를 사용하여 SMART의 기동운전을 분석해 보았다. 분석결과 각 운전단계는 그 운전단계에 적용된 운전전략에 따라 허용기준내에서 요구되는 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

핵적기동운전에서는 출력증배계수를 40초 부근으로 유지하는 제어논리를 이용하여 미임계의 원자로를 임계상태로 만들 수 있었고, 원자로가열운전에서는 노심열출력을 이용해 냉각재를 가열하는 운전전략을 채택하였는데 이때 목표출력을 이차측의 조건에 따라 다르게 설정하여 냉각재의 가열율을 조절할 수 있었고 원하는 온도까지 냉각재의 온도를 높일 수 있었다. 원자로기동운전에서는 주급수의 양을 조절함과 동시에 T/N 제어기를 이용하여 원하는 출력까지 계통의 출력을 끌어올릴 수 있었다.

향후 제어봉 이동을 최소화하고 계통 변수의 요동을 완화하는 방향으로 제어논리를 보완하고, 비응축개스의 거동 및 병렬배관에서의 유동불안정성에 대한 TASS/SMR 코드의 검증이 이루어져야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 개발 계획의 일환으로 수행된 것이다.

#### 참고 문헌

1. "SMART 계통 설명서," 한국원자력연구소, SMART-FS-DD210, Rev. 00, 1998.

2. "Fuctional Control Logic Diagram for SMART," SMART-FS-IC300, Rev. 00, 2000.
3. "TASS/SMR 열수력 모델 기술서," KAERI/TR-1835/2001, 2001.
4. "SMART 성능해석 방법론," KAERI/TR-1798/2001, 2001.

표 1. SMART 예비 보호 및 정지 설정치

계측 및 제어변수	정격 설계값	설정치	
		예비보호	정지
출력증배계수, 초	핵적기동운전	40	↓ 25    ↓ 15
노심 열출력, %	핵적기동운전		↑ 1.0
	원자로가열운전		↑ 40
	원자로기동운전		↑ 38    ↑ 45
SG 일차측 입구 온도, °C	출력/원자로기동운전	310	↑ 325    ↑ 335
가압기 압력, MPa	출력/원자로기동운전	15.0	↓ 12
			↑ 16    ↑ 17
SG 증기압, MPa	출력/원자로기동운전	3.3	↑ 4

표 2. SMART 기동운전 초기조건 및 계산결과

	영출력상태	핵적기동 운전완료	원자로 가열운전 완료상태	원자로 기동운전 완료상태
노심출력	10 <sup>-7</sup> %	0.094%	5.86%	23.7%
<u>일차계통 변수</u>				
노심유량 (kg/s)	468.7	430.2	358.3	375.9
가압기 압력 (MPa)	4.5	4.5	14.01	14.52
가압기 N <sub>2</sub> 가스 체적비	1.0	1.0	0.31	0.29
노심 출구온도 (°C)	19.99	21.3	291.2	303.6
노심 입구온도 (°C)	19.98	21.2	281.3	265.0
<u>이차계통 변수</u>				
총 급수유량 (kg/s)	7.635	7.635	7.635	30.54
SG 입구 압력 (MPa)	0.23	0.21	3.39	3.41
급수온도 (°C)	19.8	19.8	19.7	19.7
SG 출구 온도 (°C)	20.0	21.3	283.4	297.2

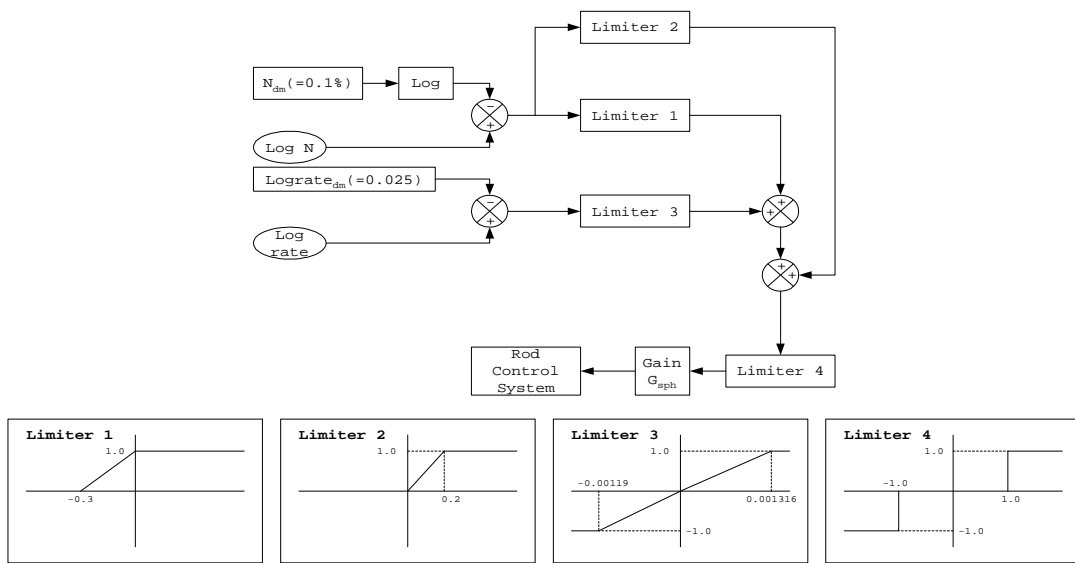


그림 1. SMART 핵적기동운전을 위한 출력제어논리

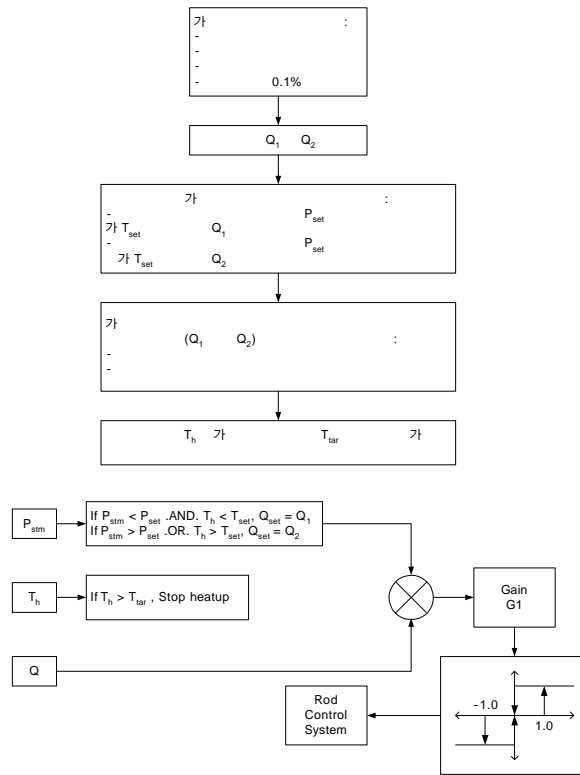


그림 2. SMART 원자로가열운전 제어논리



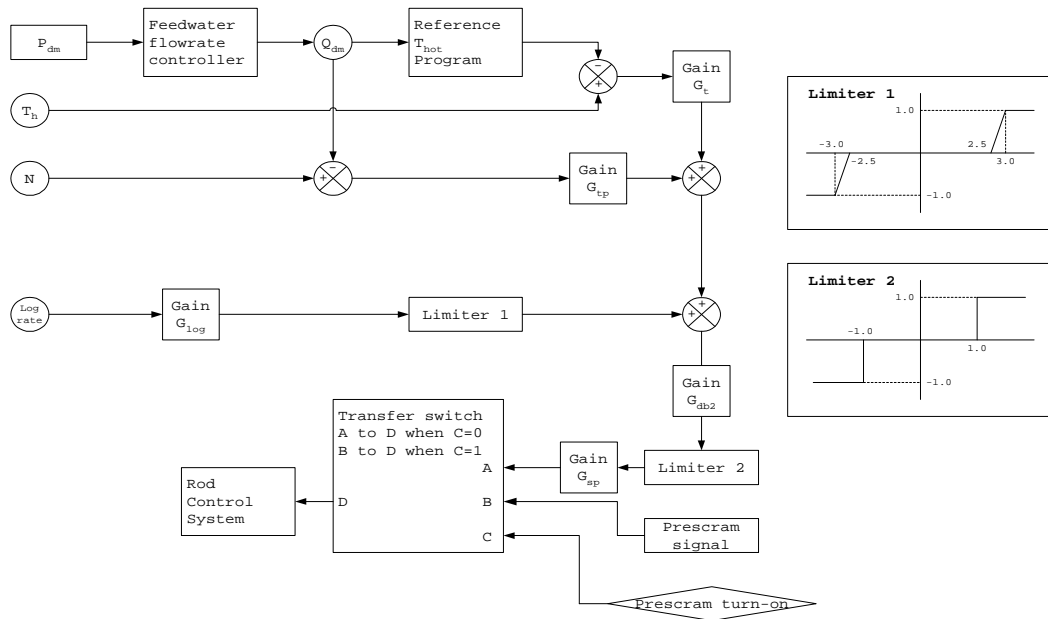


그림 3. SMART 원자로기동운전을 위한 출력제어논리

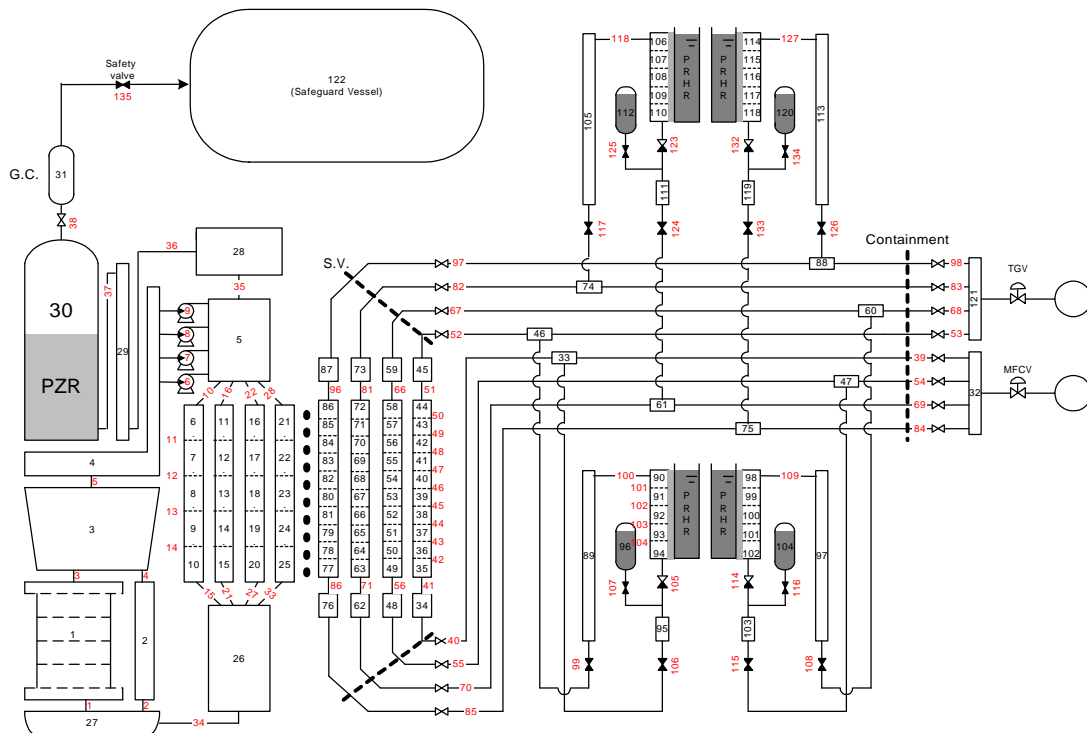


그림 4 SMART 성능 해석을 위한 Nodalization

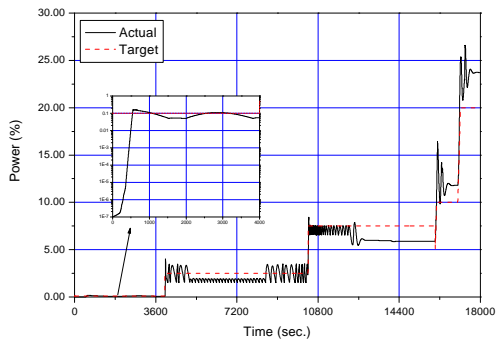


그림 5. SMART 기동운전중 출력변화

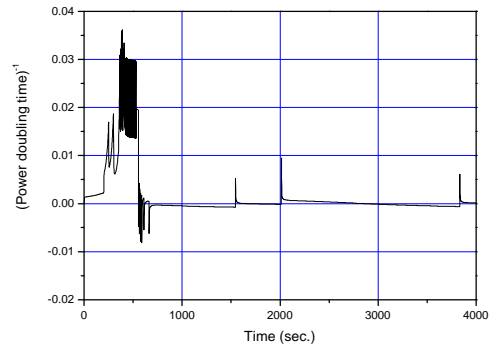


그림 6. 핵적기동운전중 출력증배계수 변화

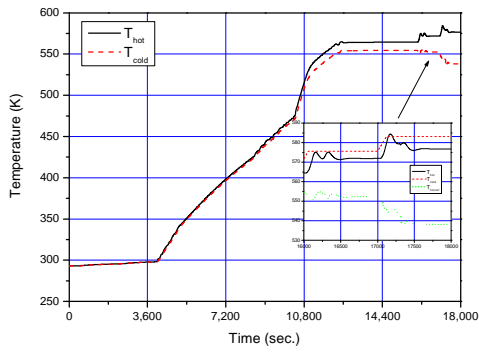


그림 7. SMART 기동운전중 냉각재 온도변화

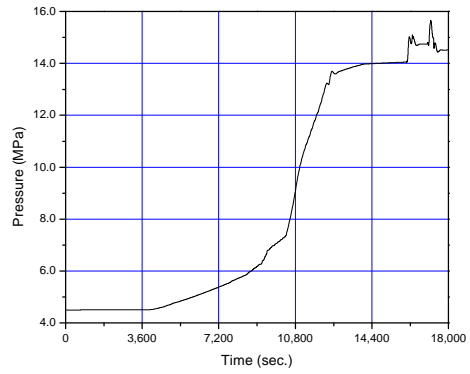


그림 8. SMART 기동운전중 가압기 압력변화

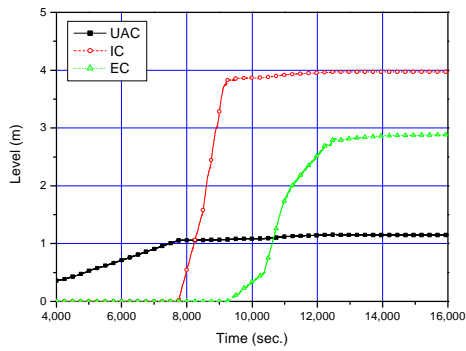


그림 9. 원자로가열운전중 가압기 수위변화

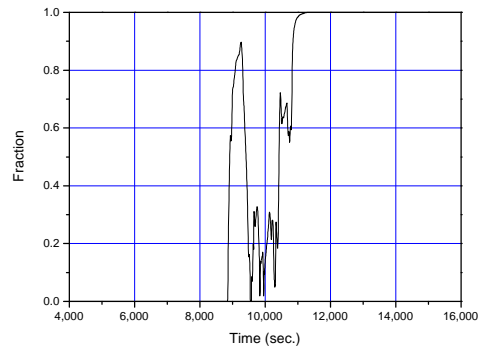


그림 10. 원자로가열운전중 증기발생기 출구 기공율 변화

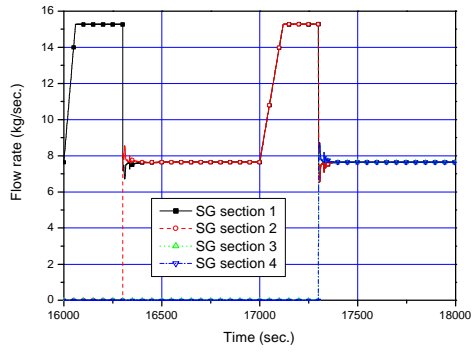


그림 11. 원자로기동운전중 주급수 유량 변화

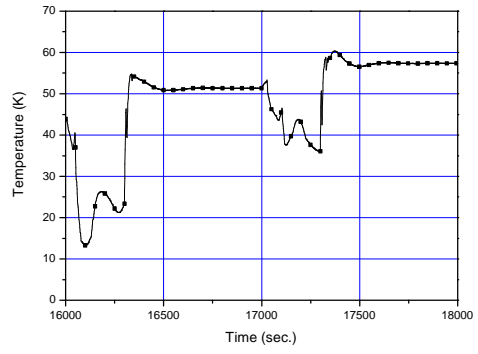


그림 12. 원자로기동운전중 이차측 증기과열도 변화