

SMART 연구용원자로 저출력 정상상태 계산 절차  
Procedure for Low Power Level Steady State Calculations of  
SMART Design Verification Program

이규형, 윤한영, 김희경, 정영중, 김희철, 지성균

한국원자력연구소  
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART 연구용원자로는 일체형원자로 SMART를 검증하기 위하여 건설이 추진 중인 원자로이다. SMART 연구용원자로의 안전해석을 수행하기 위하여 원자로의 운전범위를 포함한 운전제한조건에서 초기조건을 잡아야 한다. TASS/SMR 코드를 사용한 정상상태 계산에는 일차측의 온도, 압력과 유량, 증기발생기에서 열전달을 초기화 시키는 부프로그램이 있다. SMART 연구용원자로의 운전 범위는 주냉각재펌프가 고속 운전상태 인 경우 100% - 20%, 주냉각재펌프가 저속 운전 상태인 경우 36% - 20% 이다. 출력운전중 제어계통은 원자로의 안정된 거동을 보장하기 위하여 프로그래밍된 온도를 따르도록 제어봉을 이동 시킨다. 저출력에서의 정상상태 계산을 위하여 우선 전출력 상태에서 계산된 정상상태를 이용하여 출력감발 운전을 모사한 후, 각각의 원하는 출력 준위에서 스냅과일을 사용하여 원하는 출력준위에서의 정상상태 계산을 수행하였다. 수행된 결과는 제시된 설계 값과 잘 일치함을 확인하였다.

Abstract

SMART design verification program (SMART-P) is aimed to verify integral type reactor SMART. SMART-P is scheduled to submit licensing analysis. The safety analysis methodology for SMART-P suggested that LCO (limiting conditions for operation) should be used as initial points for calculation. TASS/SMR code several initialization routines for steady state calculation. The power range of SMART-P are such as 100% - 20% in MCP high speed mode and 36% - 20% in MCP low speed mode. The proposed procedures of low level steady state calculation are first

performing power maneuvering operation for 100% to 20%, during which generates several snap files for required power levels. Then using those snap files to produce steady state calculation. The results show that major thermal parameters are in well agreements with design values.

## 1. 서론

한국원자력연구소에서 개발 중인 일체형원자로 SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor) 의 검증을 위하여 SMART 연구용원자로가 건설을 목표로 하여 개발이 진행 중이다. SMART 연구용원자로는 모든 주기기들이 원자로 압력용기내에 장착이 되어 있는 일체형원자로이다. 안전해석방법론에서 기술한 내용에 따르면 인허가를 위한 안전해석에서의 초기조건은 운전제한조건 (LCO; Limiting Conditions for Operation) 에서 수행되어야 한다. 본 연구에서는 SMART 연구용원자로의 주요 설계 특징과 운전 범위 또한, 인허가 계산을 위하여 개발된 TASS/SMR 코드의 일반사항을 기술한다. 다음으로 TASS/SMR 코드에서 정상상태 (steady state) 계산 절차와 본 연구에서 제안하는 SMART 연구용원자로의 저출력 계산 절차에 대하여 기술한다. 본 연구에서는 SMART 연구용원자로의 100%, 75%, 50%, 36% (MCP 고속 및 저속), 20% (MCP 고속 및 저속) 출력 준위에서 정상상태 계산 결과를 보여준다.

### 2.1 SMART 연구용원자로의 주요 설계특징 및 출력운전 범위

SMART 연구용원자로는 모든 주기기들이 원자로 압력용기내에 장착이 된 일체형원자로이다. 일체형 개념을 채택함으로써 대구경 배관을 없애 대형냉각재상실사고를 방지한 특징이 있다. 압력용기내에 배치된 주요 기기들은 노심 (core)과 질소가스를 이용한 자기 가압기 (pressurizer), 2 대의 주냉각재펌프 (main circulation pump), 12 개의 증기발생기 카세트 (SG cassette), 원자로 내부구조물 (RV internals)로 이루어져 있다 (그림 xx).

일차냉각재의 유로는 다음과 같다. 노심 하부로 유입되는 저온의 냉각재는 핵연료 집합체를 지나면서 가열되어 노심 상부의 제어봉 안내관 및 환형 유로영역을 지나 주냉각재 펌프를 통과하여 증기발생기 카세트로 들어가서 이차계통으로 열을 전달한 후, 하향유로를 거쳐 노심으로 재순환된다.

두 대의 주냉각재펌프는 glandless canned motor 형태로서 축 방향으로 유체가 흐른다. 고속과 저속 두 가지 운전모드를 가지며 고속/저속운전에서 회전속도는 각각 3600 rpm과 1300 rpm이다. SMART 연구용원자로의 주냉각재펌프가 고속운전 상태일 때 100% -

20% 출력범위를 갖고 있으며, 저속운전 상태인 경우에는 36% - 20% 출력범위를 가지고 있다. 정상 출력운전 모드에서 출력범위는 100%에서 20%까지 이다.

출력운전에서 제어계통은 노심의 열출력과 일차측 증기발생기 입구온도를 제어하여 계통 거동의 안정된 거동을 보장하게 된다. 노심의 열출력은 급수유량 분율을 추종하도록 (N-control) 하며 일차측 증기발생기 입구온도는 미리 프로그램된 참조온도 (그림 1)를 추종하도록 (T-control) 한다. 주냉각재펌프가 고속운전 상태인 경우 T-control 만을 사용하여 제어봉을 이동시키고 주냉각재펌프가 저속운전 상태인 경우 N+T-control 을 사용하여 제어봉을 이동시킨다.

## 2.2 TASS/SMR 코드의 특징 및 정상상태 계산 절차

본 연구에서 사용된 전산코드는 TASS/SMR이다. TASS/SMR은 2 유체에 대하여 5개의 방정식을 이용하는 1 차원 열수력 코드로써 SMART 원자로의 주요한 거동인 나선형 증기발생기에서의 열전달 모델, 가압기의 중앙공동과 잔열제거계통의 보상탱크에 존재하는 비응축성가스인 질소의 거동, 초기 정상상태를 자동으로 초기화시켜 주는 루틴, 잔열제거계통의 튜브에서의 열전달 모델 등이 있다.

TASS/SMR 코드에서 정상상태 계산을 위한 절차를 요약하면 다음과 같다.

1. 안전 및 성능해석 수행하기 위한 nodalization (그림 2).
2. 설계 값에서 제시한 주요 열수력 값들을 입력함
3. 이차측 주증기 압력을 설계 목표 값에 유지하도록 주증기 조절밸브를 사용함 (그림 3).
4. 이차측 급수 유량 및 엔탈피 입력하여 유량 경계조건으로 사용함
5. 일차 / 이차 계통의 압력 / 온도를 일정하게 유지하기 위하여 일차측 가압기, 일차측 증기발생기 입구노드, 이차측 피동잔열제거 계통의 water side 노드의 체적을 계산 초기 일정 기간 동안 크게 유지한 후 일정 시점이 경과하면 원래의 체적으로 환원함.
6. 계산 초기에 주냉각재펌프의 유량을 일정하게 유지하도록 수두를 초기화 함.
7. 계산 초기에 증기발생기에서 일차 / 이차측 열전달을 안정화 시키도록 열전달 면적을 조절함.

상기 절차에 따라 계산을 수행하여 주요 계통의 거동이 안정화 되면 그 때 모든 계산된

열수력 값을 저장하고 (snap file generation) 계산을 종료하여 정상상태 계산을 끝낸다.

## 2.3 SMART 연구용원자로의 저출력 정상상태 계산 절차

SMART 연구용원자로의 각각의 출력준위에서 정상상태를 계산하기 위하여 두 단계를 수행하였다. 먼저 100% 정격출력 상태에서 정상상태 계산을 2.2 절의 내용에 따라서 수행하였다. 이때 사용한 nodalization은 그림 2에 나와 있다. 이 후 20% 출력 까지 T-control 을 사용하여 출력감발 운전을 수행하였으며 두 대의 주냉각재펌프 속도를 저속으로 전환하여 36% -> 20% 까지 출력 감발운전을 수행하였다. 상기 출력감발 운전의 과정은 표 1에 나와 있다. 출력감발 운전에서 원하는 출력 준위에 도달했을 때 주요 계통 거동은 표 2에 요약되어 있다. 출력감발 운전에서 주요 계통변수의 거동은 그림 4 - 7에 나와 있다.

두 번째 단계로 특정시점 (주냉각재펌프 고속모드에서 75%, 50%, 36% 20%; 주냉각재펌프 저속모드에서 36% 20%)에서 생성된 snap file 을 사용하여 2.2 절의 정상상태 계산을 수행하였다. 각각의 정상상태 계산 결과는 표 3에 요약되어 있으며 주요 계통의 거동은 그림 8 - 11에 나와 있다.

## 3 결론

SMART 연구용원자로의 저출력 준위에서 정상상태 계산이 출력감발 운전과 이 때 잡은 snap file을 이용한 정상상태 계산을 통하여 구해졌다. 계산된 결과는 설계 값과 만족할 정도로 일치하며 향후 안전해석의 초기조건으로 사용될 수 있음을 확인 하였다.

## 4. 참고문헌

- [1] 윤한영, "TASS/SMR 열수력 모델 기술서", KAERI/TR-1835/2001, 한국원자력연구소, 2001.
- [2] 김환열, "SMART 계통 설명서", SMART-FS-SD210, revision 00, 한국원자력연구소, 1998.
- [3] 임홍식, "SMART 출력제어 개념개발을 위한 출력감발 해석", KAERI/TR-1073/98, 한국원자력연구소, 1998.

표 1 출력감발 운전 전개과정

시간, 초	과도 전개
0 ~ 15	급수유량 감소 100 % -> 75 %
500	<b>snap for 75 % transient file</b>
500 ~ 515	급수유량 감소 75 % -> 50 %
1000	<b>snap for 50 % transient file</b>
1000 ~ 1014	급수유량 감소 50 % -> 36 %
2000	<b>snap for 36 %_high transient file</b>
2000 ~ 2016	급수유량 감소 36 % -> 20 %
3000	<b>snap for 20 %_high transient file</b>
3000 ~ 3016	급수유량 증가 20 % -> 36 %
4000 ~ 4016	1st 주냉각재펌프 speed 100% -> 36% 감소
4500 ~ 4516	2nd 주냉각재펌프 speed 100% -> 36% 감소
6000	<b>snap for 36 %_low transient file</b>
6000 ~ 6016	급수유량 감소 36 % -> 20 %
7000	<b>snap for 20 %_low transient file</b>

표 2 출력감발 운전 주요 계통변구의 계산 값

	100%	75%	50%	36%	36% (Low)	20%	20% (Low)
PZR_P (MPa)	14.7	14.7	14.7	14.7	14.8	14.68	14.66
	<b>14.7235</b>	<b>14.5968</b>	<b>14.5769</b>	<b>14.6652</b>	<b>14.3519</b>	<b>14.8630</b>	<b>14.4354</b>
T hot (K)	583	580	578	577	583	575	578
	<b>583.23</b>	<b>581.09</b>	<b>578.72</b>	<b>577.48</b>	<b>582.52</b>	<b>575.71</b>	<b>578.03</b>
T cold (K)	547	554	560	564	547	568	558
	<b>548.20</b>	<b>554.77</b>	<b>561.30</b>	<b>565.04</b>	<b>547.31</b>	<b>568.86</b>	<b>558.70</b>
MCP flow (kg/s)	350	350	350	350	126	350	126
	<b>349.98</b>	<b>351.38</b>	<b>353.16</b>	<b>354.16</b>	<b>128.14</b>	<b>355.78</b>	<b>128.1</b>
steam_T (K)	573	579	578	577	583		
	<b>558.57</b>	<b>569.94</b>	<b>573.81</b>	<b>574.65</b>	<b>578.38</b>	<b>574.45</b>	<b>576.54</b>
steam_P (MPa)	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
	<b>3.2453</b>	<b>3.2458</b>	<b>3.2455</b>	<b>3.2453</b>	<b>3.2453</b>	<b>3.2453</b>	<b>3.2452</b>

표 3 SMART 연구용원자로의 저출력 정상상태 주요 계통변수 값

	75%	50%	36%	36% (Low)	20%	20% (Low)
PZR_P (MPa)	14.7	14.7	14.7	14.8	14.68	14.66
	<b>14.6950</b>	<b>14.6936</b>	<b>14.7159</b>	<b>14.8120</b>	<b>14.6979</b>	<b>14.6714</b>
T hot (K)	580	578	577	583	575	578
	<b>580.25</b>	<b>578.23</b>	<b>577.20</b>	<b>583.12</b>	<b>575.21</b>	<b>578.20</b>
T cold (K)	554	560	564	547	568	558
	<b>554.08</b>	<b>560.93</b>	<b>564.81</b>	<b>548.06</b>	<b>568.35</b>	<b>558.90</b>
MCP flow (Kg/s)	350	350	350	126	350	126
	<b>349.96</b>	<b>349.96</b>	<b>350</b>	<b>126</b>	<b>350</b>	<b>125.99</b>
steam_T (K)	579	578	577	583		
	<b>557.30</b>	<b>556.35</b>	<b>555.64</b>	<b>555.97</b>	<b>555.27</b>	<b>557.88</b>
steam_P (MPa)	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
	<b>3.24509</b>	<b>3.24534</b>	<b>3.22043</b>	<b>3.24548</b>	<b>3.25498</b>	<b>3.24633</b>

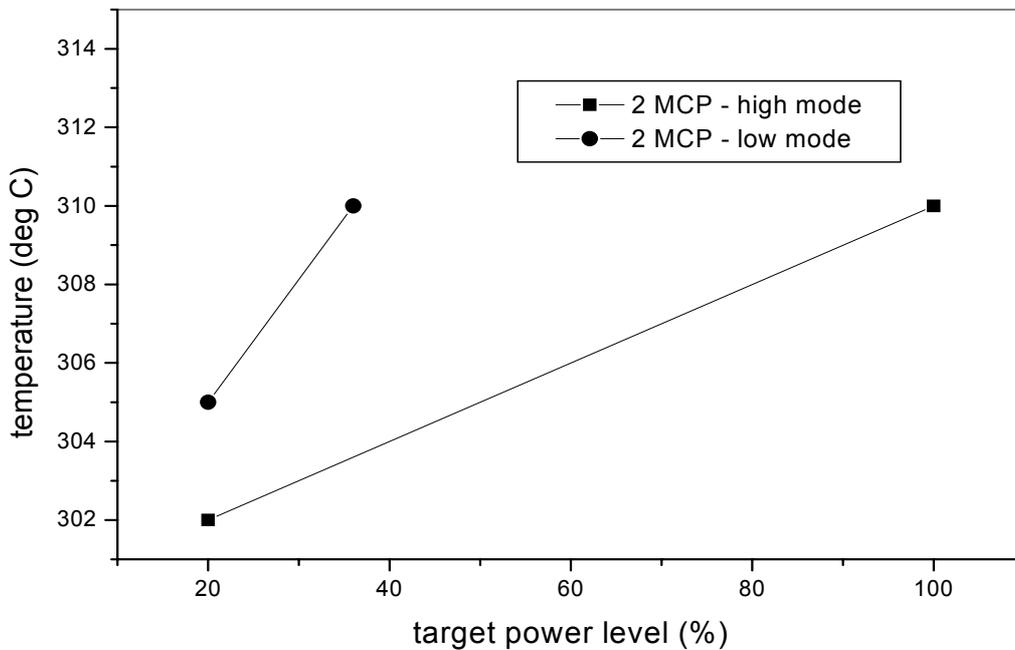


그림 1 프로그램된 일차측 증기발생기 입구온도

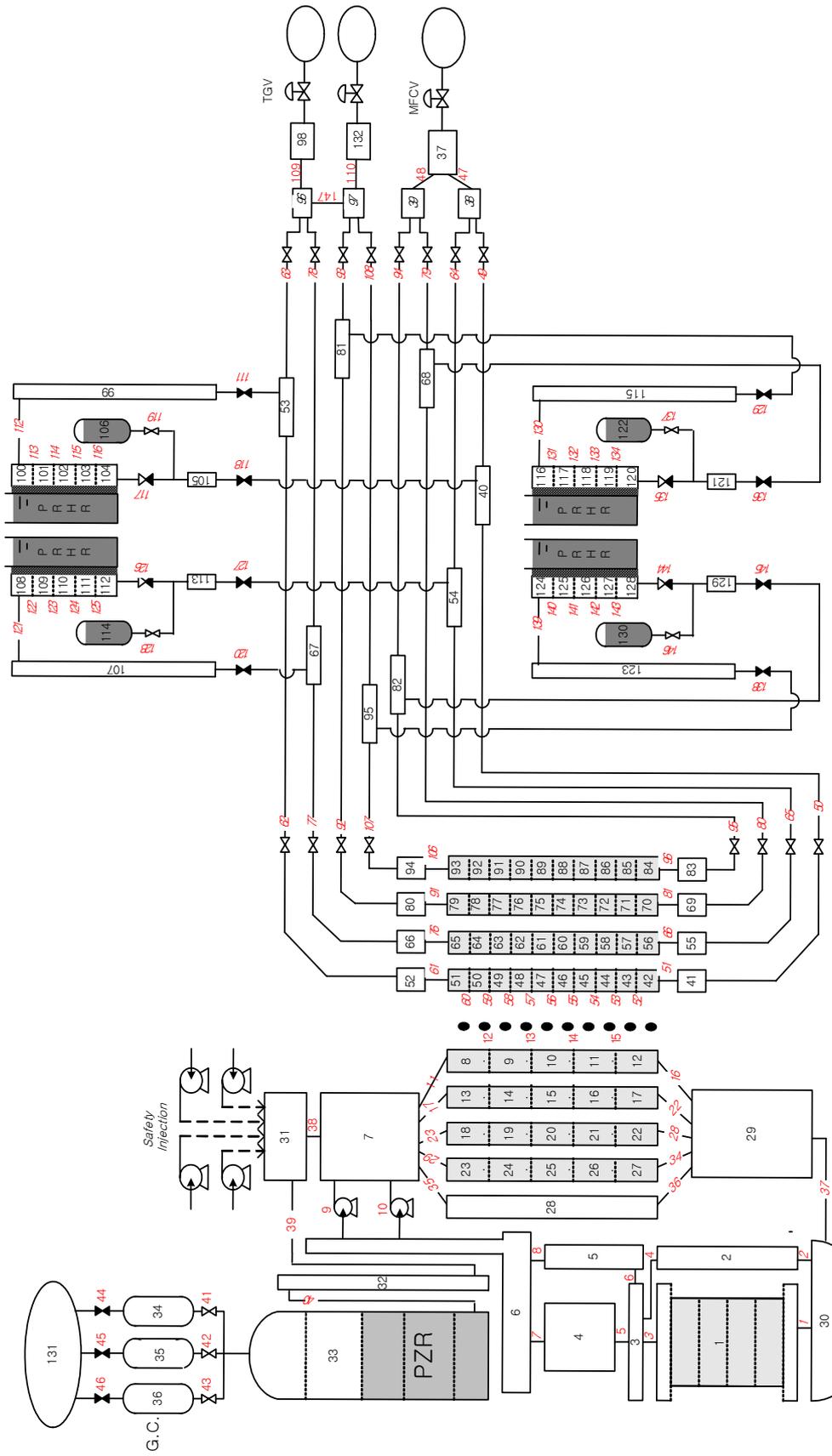


그림 2 SMART 연구용원자로 nodalization

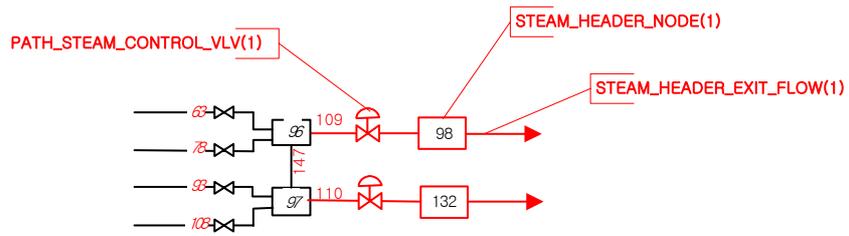


그림 3 steam pressure control valve control logic

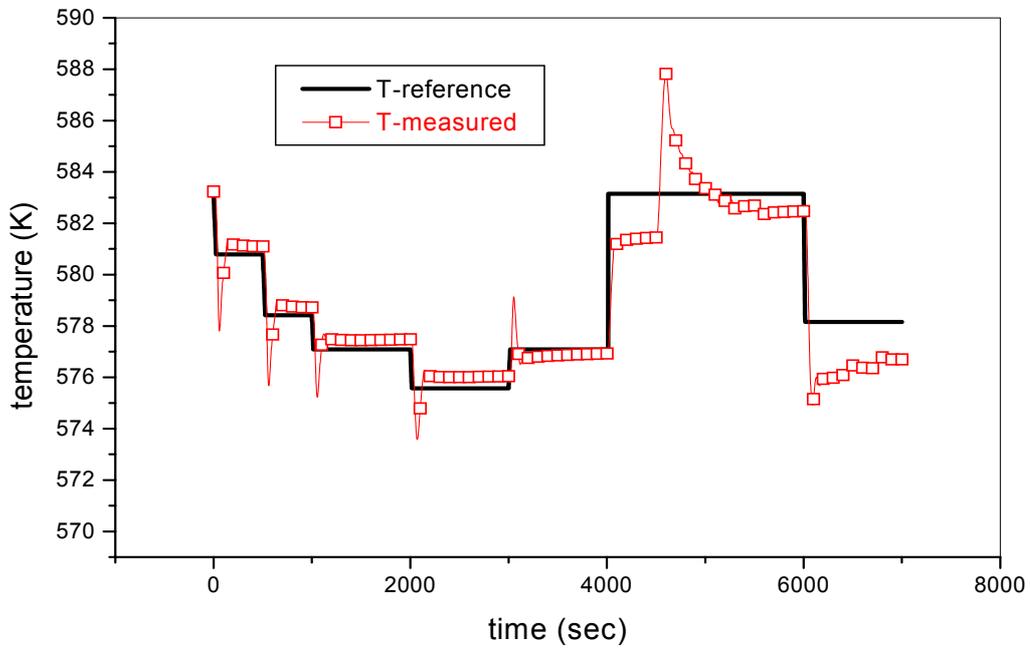


그림 4 출력감발 운전에서 일차측 증기발생기 입구온도 천이

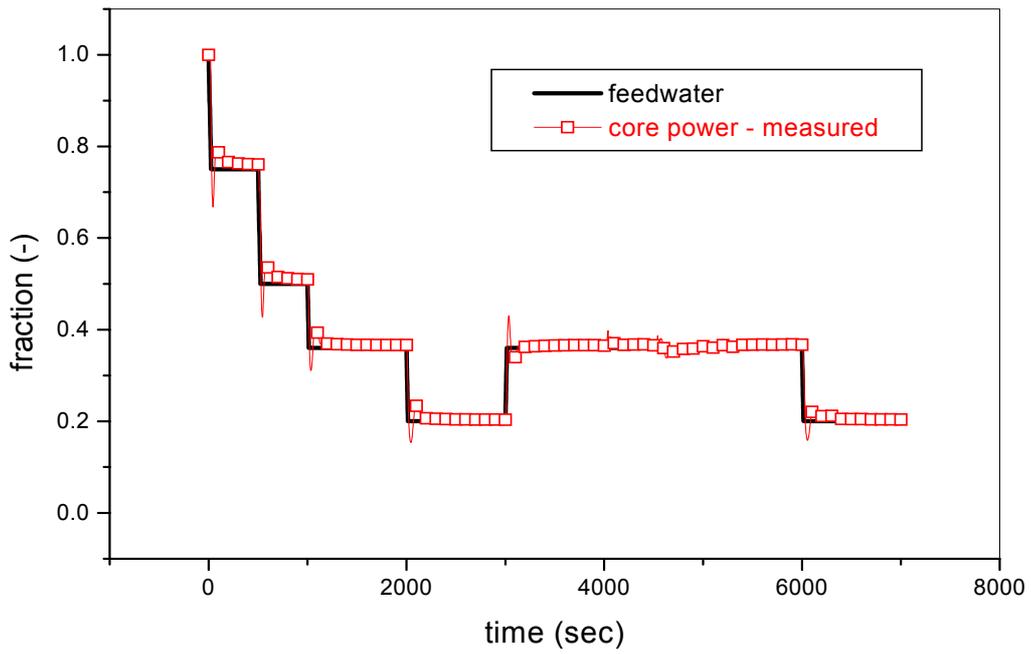


그림 5 출력감발 운전에서 노심출력 천이

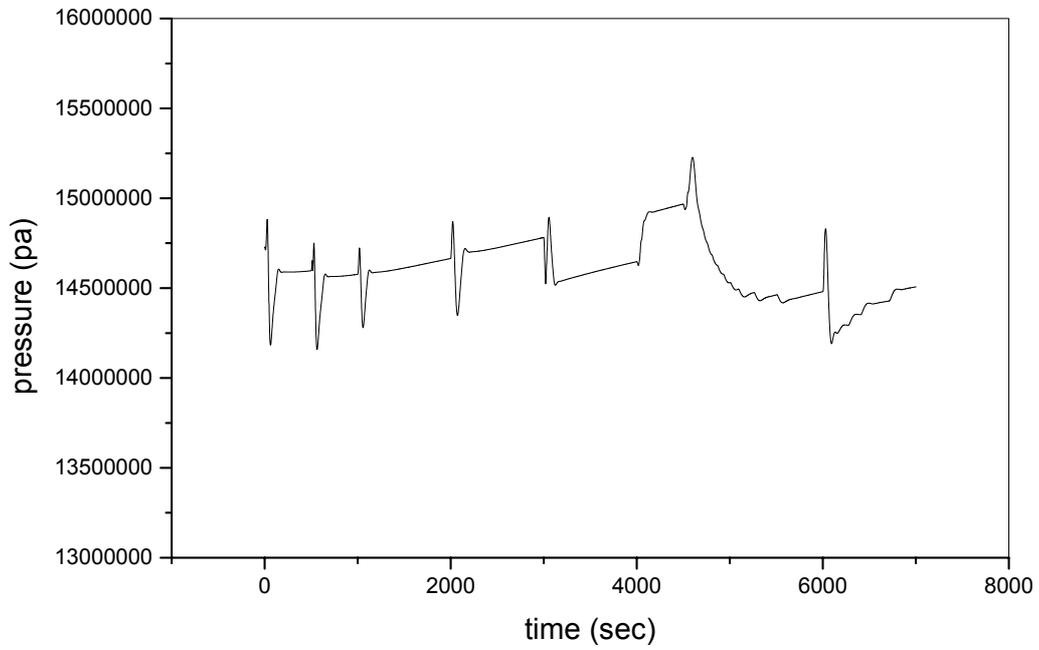


그림 6 출력감발 운전에서 가압기 압력 천이

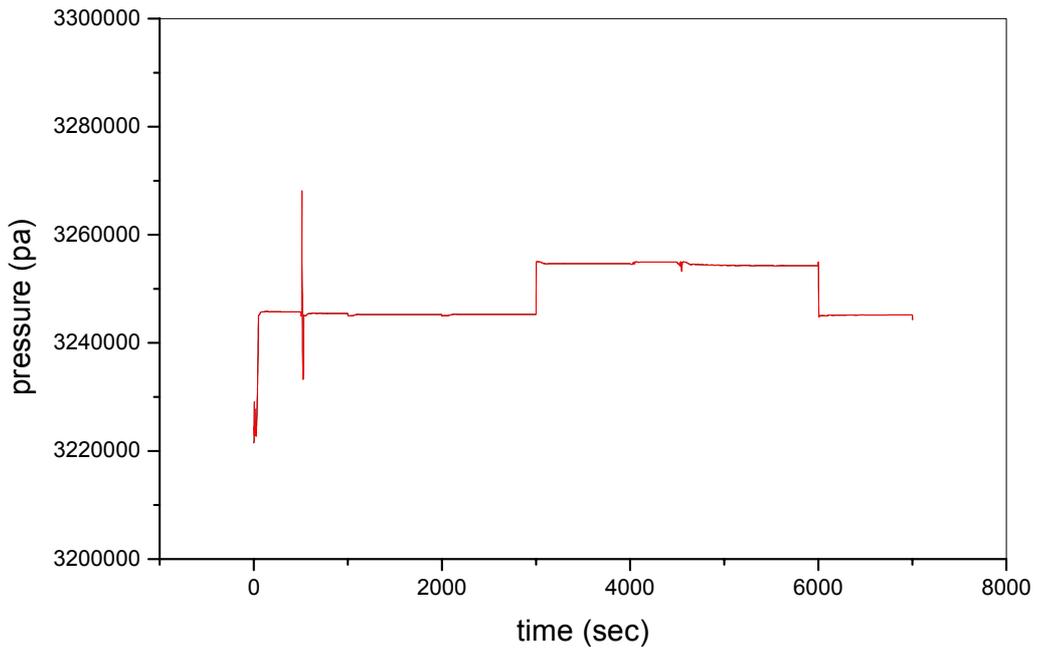


그림 7 출력감발 운전에서 node 96 압력 천이

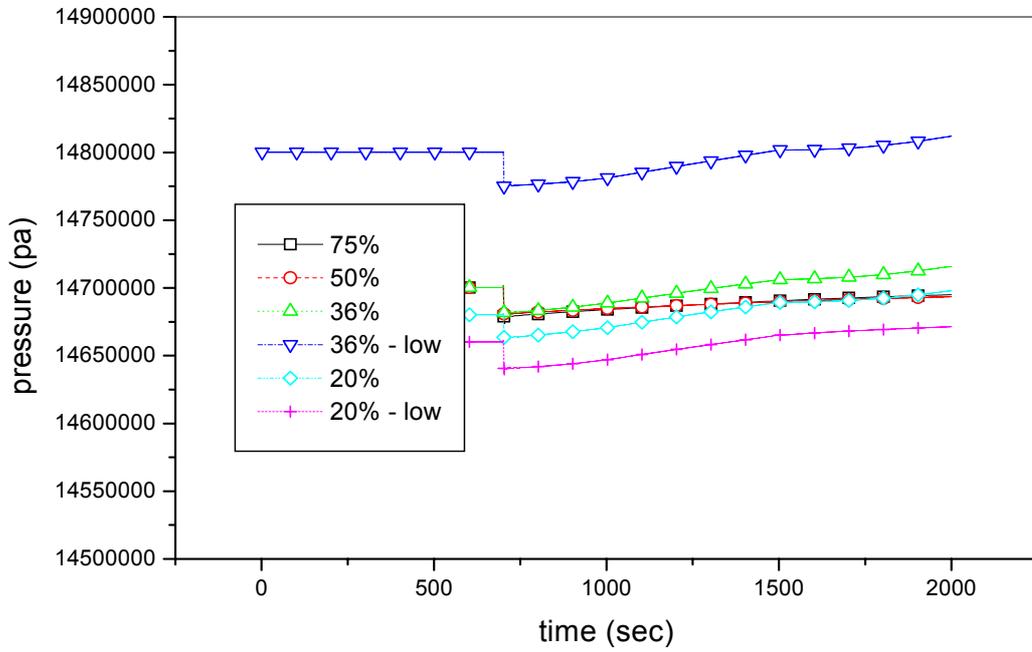


그림 8 저출력 정상상태 계산에서 가압기 압력 거동

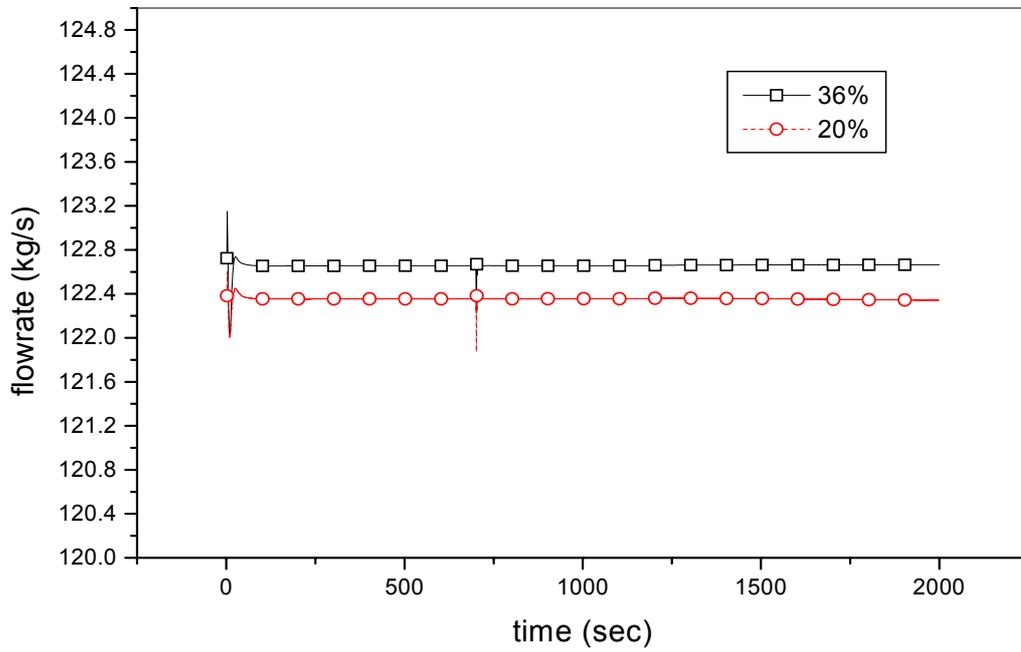


그림 9 저출력 정상상태 계산에서 MCP 저속모드의 노심입구 유량 거동

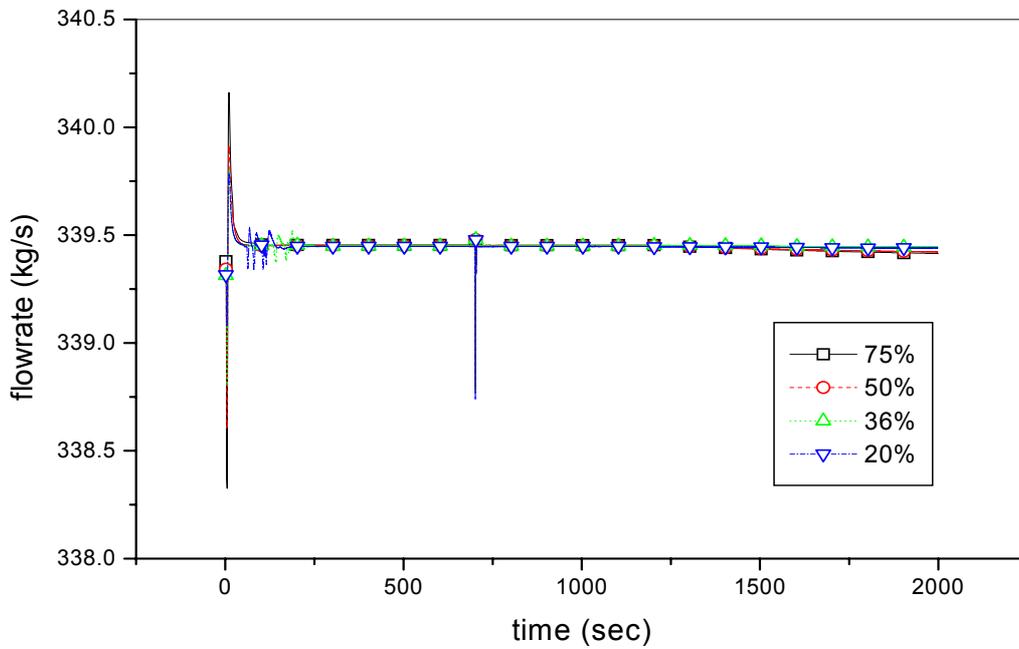


그림 10 저출력 정상상태 계산에서 MCP 저속모드의 노심입구 유량 거동

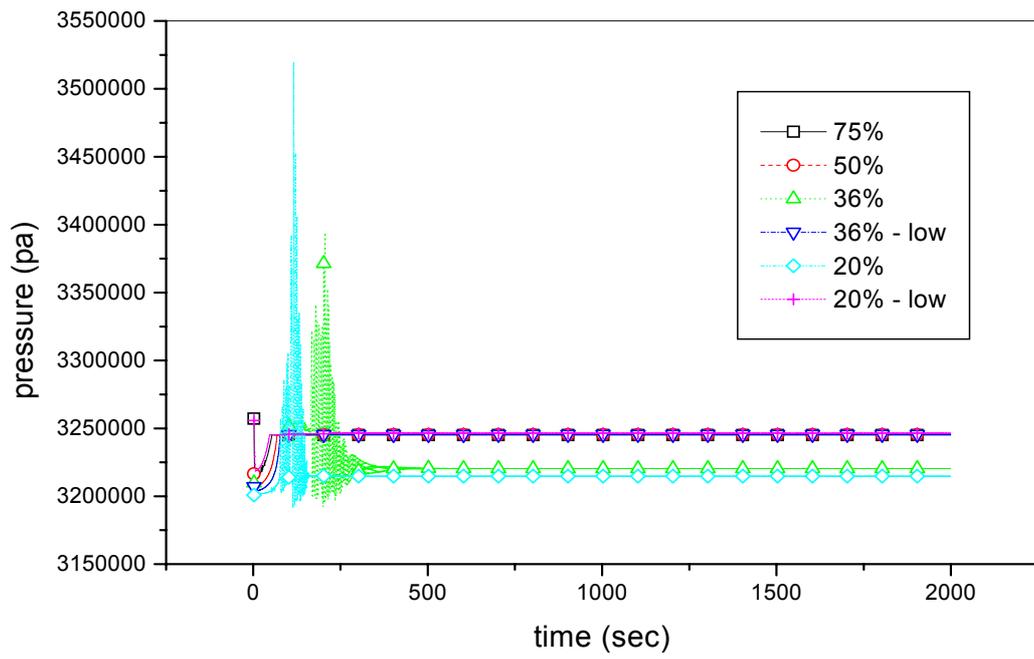


그림 11 저출력 정상상태 계산에서 node 96 압력 거동