

SMART 주냉각재펌프 1대 정지 운전시 성능 해석

Performance Analysis on the Operation of SMART Main Coolant Pump 1 Stop

양수형, 김희철, 장문희

동력로기술개발팀
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

TASS/SMR 코드를 이용하여 SMART 주냉각재펌프 1대 정지 운전시 운전 성능을 평가하였다. 100% 출력의 BOC 조건을 초기 조건으로 사용하고, 계측기의 시간 지연, 사건 시나리오에 필요한 제어 논리 및 일부 가정을 이용하여 주냉각재펌프 1대 정지 운전에 대한 성능 해석을 수행한 결과, 계통 압력, 일차측 증기발생기 입구 온도 및 이차측 증기발생기 증기압 등과 같은 주요 계통 변수들은 허용 기준 이내에서 유지되는 것으로 분석되었다. 그리고 노심 노드의 냉각재 온도는 포화 온도에 비하여 낮게 유지되는 것으로 나타났다. 이와 더불어 MOC 및 EOC 조건하에서도 주냉각재펌프 1대 정지 운전에 대한 성능 평가를 수행하였는데, MOC 및 EOC 조건하에서의 주요 계통 변수들은 허용 기준을 초과하지 않는 것으로 분석되었으며, 주요 변수들의 경향은 BOC 조건에서의 경향과 비슷한 것으로 나타났다.

Abstract

With TASS/SMR code, performance analyses have been performed on the MCP 1 stop operation of SMART. According to the performance analysis considering 100% power level of BOC condition, delay time of measuring instruments, control logic for the event scenario and some assumptions, major system parameters, including system pressure, inlet temperature of primary steam generator, outlet steam pressure of secondary steam generator and etc., were maintained within the allowable criteria. The coolant temperature of core node was also maintained quite below saturated condition. In addition, under MOC and EOC conditions, performance analyses on the MCP 1 stop operation have been performed. Under MOC and BOC conditions, the allowable criteria on major parameters were not violated, and the trends of the parameters were analyzed to be similar to those of BOC condition.

1. 서론

SMART(System-Integrated Modular Advanced Reactor)는 주요 계통의 상태에 따라서 다양한 노심 출력 운전(20%로부터 100%까지)을 구현할 수 있다[1]. 이와 더불어 SMART는 일차 계통에서 비대칭 유동을 형성하는 경우에도 출력 운전을 하고자 하는데, 이러한 비대칭 유동을 형성하는 시나리오로는 주냉각재펌프(Main Coolant Pump; MCP) 1대 정지 운전과 증기발생기(Steam Generator; SG) 2구역 격리 운전이 있다. 이러한 사건 발생시 정격 출력보다 낮은 출력 수준에서 출력 운전이 이루어지도록 하고 있다. MCP 1대가 정지하는 경우 펌프 수두의 차이로 인하여 펌프 방출구의 환형 영역에서의 유동/온도 분포가 비대칭적이 될 수 있다. 이러한 유동/온도 비균일 거동이 노심에 전파되면 국부적으로 SMART의 열적 여유도를 저하시킬 수 있다. 따라서 비대칭 거동이 나타나는 사건시 계통 변수들이 허용 기준을 만족하는 상태에서 출력 운전이 가능한지 평가하는 것은 상당히 중요하다.

본 논문에서는 TASS 코드[2]를 기본으로 하여 SMART에 필요한 모델 및 열전달 상관식을 추가하여 개발된 TASS/SMR(Transient And Setpoint Simulation/Small and Medium Reactor) 코드를 이용하여 MCP 1대 정지 운전시 SMART의 전반적인 계통 변수들을 분석하고, SMART의 계통 변수들이 허용 기준 이내에서 유지될 수 있는지 여부를 파악하고자 한다.

2. 해석 방법

가. 분석 코드

본 논문에서 고려된 MCP 1대 정지 운전과 같은 SMART의 비정상 출력 운전 모드에 대한 성능 해석에서 사용된 코드는 KAERI에서 SMART의 성능 및 안전 해석을 위하여 개발중인 TASS/SMR(Transient And Setpoint Simulation/Small and Medium Reactor) 코드이며, 해석에서 사용된 데이터는 참고 문헌 [3]을 기본으로 하였다.

TASS/SMR 코드는 SMART의 운전 전 영역에 대한 열수력 거동을 모의할 수 있도록 TASS 코드를 기본으로 하여 개발되었다. TASS 코드는 기본 열수력 모델, 데이터베이스 관리, 제어 계통 모델 그리고 각종 부품 모델을 기본으로 개발되었으며, 이러한 TASS 코드에 SMART에 적절한 증기발생기 열전달 모델 등과 같은 모델을 보완하여 TASS/SMR 코드를 개발하였다. TASS/SMR 코드를 이용한 SMART 성능 해석에서 사용되는 Nodalization을 그림 1에 나타내었는데, 일차 및 이차 계통을 각각 122개의 노드와 135개의 유로로써 모사하고 있다.

일차 계통의 경우 노심(노드 1)에서 MCP(유로 6, 7, 8, 9) 그리고 증기발생기 일차측(노드 6에서 25) 및 하향 유로(노드 26)를 통한 순환 유로가 형성되며, 증기발생기 일차측은 이차 계통과 일치하게끔 4개의 독립 유로들로 구성된다. 핵연료봉은 반경 방향으로 5개의 노드와 축 방향으로

12개의 노드로 세분화되며, 12개의 분할 유체 영역을 가지는 노심 노드와 연계되어 열전도 및 열 전달 거동을 예측한다. 그리고 환형 공동, 주변 공동 및 가압기가 Nodalization에서 고려되었으며, 일차측 가압 사고시 안전 밸브를 통하여 안전보호용기로 냉각재가 방출되는 현상을 모의하기 위하여 안전 밸브 및 안전보호용기도 일차 계통에 포함되어 있다. 이차 계통의 경우 독립된 4개의 섹션으로 구성되는 SMART 이차 계통의 구조와 일치하게끔, 4개의 이차 계통 유로와 피동잔열제거계통(PRHRS: Passive Residual Heat Removal System)으로 구성된다. 증기발생기 나선형 튜브와 피동잔열제거계통 열교환기 튜브 영역에서는 노드를 세분화함으로써, 단상 액체에서 이상 유체를 거쳐 단상 증기로 되는 혹은 그 역으로 되는 급격한 유체 특성 변화를 모사할 수 있도록 하였다. 피동잔열제거계통은 이차 계통 유로의 급수관 및 증기관과 연결되어 있으며, 보상 탱크(노드 96, 104, 112, 120)가 각 피동잔열제거계통의 열교환기 출구쪽에 연결되어 있다. 그리고 피동잔열제거계통의 열교환기 출구에는 Check Valve를 모델함으로써 이차 계통을 통한 순환 유로의 역류를 방지하도록 하였다.

나. 해석 방법 및 허용 기준

MCP 1대 정지 운전과 같은 비정상 출력 운전은 성능 관련 설계기준사고이다. 이러한 성능 관련 설계기준사고에 대한 해석은 최적 초기 조건 및 최적 해석 입력을 사용하고, 관련된 모든 공정 계통이 정상적으로 작동한다고 가정한다. 그리고 SMART에 있어 증기발생기는 10%의 튜브 관막음(Plugging Margin)을 가지도록 설계되었기 때문에, 72개의 증기발생기 모듈 중 7개의 모듈이 관막음된 것으로 가정하였다. MCP 1대 정지 운전에 대한 해석은 BOC(Beginning of Cycle), MOC(Middle of Cycle) 및 EOC(End of Cycle)에 대하여서 수행되었으며, 노심 출력, 일차측 증기발생기 입구 냉각재 온도 및 일차 계통 압력에 대한 계측 신호의 시간 지연을 고려하였다. 그러나 급수 유량 및 증기발생기 입구에서의 온도 등의 초기 운전 변수 편차(Parameter Deviation)의 영향은 고려 대상에서 제외되었다.

MCP 1대 정지 운전은 비정상 출력 운전에 포함되는데, 비정상 출력 운전시 허용 기준은 다음과 같다[4].

- 표 1에 기술된 원자로 정지 신호중 출력 운전과 관련된 원자로 정지 신호가 발생하지 않아야 한다.
- 노심에서 충분한 열적 여유도를 확보하기 위해 핵비등이탈율(DNBR: Departure from Nucleate Boiling Ratio)이 최소 DNBR 이상이어야 하고, 냉각재 비등이 허용되지 않는다.

다. 사건 경위 및 초기 조건

과도 시작 이전 일차 계통은 100% 정상 출력 운전하에서 4 대의 MCP가 모두 작동하는 강제 순환/고속 운전 상태이며, 가압기 상부에 연결되어 있는 개스 실린더는 개방된 상태에 있다. 이때 MCP 1대가 정지하는 과도 상태가 발생하게 되는데, 정상 작동중인 3대의 MCP만으로 출력 운전을 지속하게 된다. 이때 노심 유량 감소로 인해 핵비등 이탈 여유도가 저해되기 때문에 출력 운전 범위는 20%에서 75%로 제한된다. 정지되는 MCP 속도가 정격 속도의 80%에 도달하면, 급수 유량은 75%까지 분당 5%의 비율로 감소한다. 또한 반응도 제어 논리 기준인 Sliding T_{ref} 프로그램이 Constant T_{ref} 로 변경되어 일차 계통을 통한 유량 감소시 노심 입구 온도의 감소로 인한 감속재 밀도계수(Moderator Density Coefficient; MDC) 반응도 변화 폭을 줄여준다. 이러한 과도 상태에서는 운전원의 개입을 허용하지 않는 것으로 가정하였으며, 따라서 100%에서 75% 출력으로 안정화되는 모든 과정은 자동 제어에 의해 이루어진다. 이후 계통 변수가 안정됨에 따라 20%에서 75% 사이의 출력 운전이 가능해지는데, 이때의 출력 변동은 최대 5%/분의 속도로서 이루어진다.

서론에서 언급한 바와 같이 MCP 1대 정지시 유동의 비대칭 거동이 있을 수 있으나, 본 논문에서는 MCP 1대가 정지하더라도 노심을 통과하는 동안에 유동 분포가 균일하게 되어 일차측 증기 발생기 입/출구에서도 유동 분포가 균일하게 될 것이라고 가정하였다. 해석 초기 조건은 BOC, MOC 및 EOC 조건하에서 얻어진 100% 정격 출력 운전 조건이 사용되었다.

라. 제어 논리

출력 변동이나 운전중 예상 과도시 공정 변수의 변화로 계통 조건이 정상 운전 조건으로부터 벗어나게 될 경우에 적절한 제어를 통해 안정 모드로 복귀시킬 필요가 있는데, 본 성능 해석에서는 이를 위하여 출력-유량 편차와 온도 편차를 결합한 제어 방식인 T/N 제어를 이용하였다[4].

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

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.

비정상 운전시에는 공정 변수의 큰 변화가 발생하여 원자로 정지 신호 설정치에 도달할 가능성이 있으며, 이를 방지하기 위해 SMART에는 예비 보호(Pre-Scram) 신호가 있다(표 1). 본 논문에서는 노심 출력, 가압기 압력 등과 같은 계통 변수에 의해 Pre-Scram 신호가 발생하면 제어봉이 7.5 Step 삽입되는 것으로 가정하였다(정상시 제어봉의 삽입 및 인출은 1 Step씩 이루어짐).

3. 해석 결과

가. BOC 조건하에서 MCP 1대 정지 운전

MCP 1대 정지 운전을 모의하기 위해서 MCP의 감속은 2.5초만에 MCP의 정격 속도의 50%로, 그리고 이후 12.5초만에 선형적으로 감소하여 정지하는 것으로 가정하여 MCP 1대 정지 운전에 대한 해석을 수행하였다. 초기 과도 발단은 MCP 1번의 정지인데, 시간에 따른 MCP 속도를 그림 2에 나타내었다.

노심 유량 및 증기발생기 이차측 입/출구 유량 변화를 그림 3과 4에 나타내었다. 노심 유량은 MCP 1대 정지로 인해 사고 초기에 급속히 감소하여, 노심 출력이 75% 출력 수준으로 유지된 이후 약 1250 kg/sec 근방에서 안정화되는 것으로 나타났다. 75% ↔ 20% 출력 변화시 노심 유량은 계통의 압력 및 온도 변화로 인하여 다소 변화하기는 하지만, 해석 초기와 해석 종결 시점에서의 노심 유량은 비슷한 것으로 나타났다. MCP는 언급된 가정에 의하면 1초만에 정격 속도의 80%에 도달하게 된다. MCP 속도가 80%에 도달하는 시점부터 급수 유량은 분당 5% 비율로 300초만에 75%까지 감소하게 되며, 300초 후에는 급수 유량은 정격 유량의 75%에 도달하게 된다. 또한 증기발생기 출구를 통하여 빠져나가는 증기 유량은 해석 초기 및 정격 유량의 75%에 도달하는 시점에 다소 차이는 있지만, 급수 유량의 변화를 잘 추종하는 것으로 나타났다. 그리고 75% ↔ 20% 출력 변화시 급수 유량은 분당 5%의 비율로 변하는데, 출력 변화시 증기 유량은 큰 차이 없이 급수 유량의 변화를 잘 추종하는 것으로 계산되었다.

노심 출력 변화를 그림 5에 나타내었는데, 노심 출력은 사고 초기에 급격하게 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 노심 유량의 감소로 인해 냉각재 온도가 증가하여 발생하는 냉각재 밀도 감소로 인한 큰 부(-)의 감속재 밀도 반응도가 증가하기 때문이다(그림 6). 이후 노심 출력은 노심 온도 계수, 감속재 밀도 계수 및 T/N 제어에 의한 제어봉의 위치 변화에 따라서 진동을 하다가 약 75% 출력 수준에서 유지되는 것으로 나타났다. 75% ↔ 20% 출력 변화시 초기에는 노심 출력은 목표 출력을 잘 추종하는 것으로 나타났으나, 그림 7에 보이는 것처럼 가압기 압력이 가압기 Pre-Scram 설정 압력인 16.0 MPa를 초과하는 1400초 부근부터 노심 출력은 목표 출력 근방에서 진동하는 것으로 나타났다. 이러한 출력의 진동 현상은 20% 출력에서 지속적으로 나타났으며, 20% 출력에서 75% 출력으로 출력 증가에 따라서 서서히 사라져 노심 출력은 목표 출력을 추종하게 되는 것으로 계산되었다. 시간에 따른 반응도의 변화를 그림 6에 나타내었는데, 노심 출력이 과도 초기에는 제어봉의 인출/삽입에 의한 제어봉 반응도 및 냉각재 밀도와 핵연료 온도에 의한 반응도의 변화가 존재하지만, 노심 출력이 75% 수준에서 일정하게 유지되는 시간에서는 반응도의 변화는 없는 것으로 분석되었다. 75% ↔ 20% 출력 변화시에도 과도 초기처럼 제어봉의 인출/삽입에 의한 제어봉 반응도 및 냉각재 밀도 및 핵연료 온도에 의한 반응도의 변화가 존재하는 것으로 계산되었다. 특히 가압기 압력이 Pre-Scram 압력의 초과 여부에 따라서 제어봉에 의한 반응도는 급격하게 변하게 되며, 이로 인해 냉각재 밀도 및 핵연료 온도에 의한 반응도는 큰 영향을 받는 것으로 계산되었다. 이후 75% 수준에서 노심 출력이 안정화된 이후 시점부터는 반응도의 변화는 없는 것으로 나타났다.

그림 7은 가압기 압력 변화를 보여주고 있는데, 그림 8을 통해 가압기 압력의 변화를 파악할

수 있다. 사고 초기 시점부터 약 20초까지는 증기발생기를 통하여 방출되는 열량이 노심에서 방출되는 열량에 비해 많기 때문에 가압기 압력은 감소하게 되며, 20초 이후에서 50초까지는 증기발생기를 통하여 방출되는 열량이 노심에서 발생하는 열량에 비하여 작기 때문에 가압기 압력은 감소하게 된다. 이후 시간부터는 열평형을 이루게 되어서 가압기 압력은 약 15 MPa로 일정하게 유지되는 것으로 분석되었다. 75% ↔ 20% 출력 변화시에는 노심 출력이 감소함에 따라서 지속적으로 진동하는 노심 발생 열량과 증기발생기를 통하여 방출되는 열량의 차이에 따라서 가압기 압력은 증감을 반복하는 것으로 나타났다(그림 9). 노심 발생 열량이 지속적으로 진동하는 이유는 가압기 압력이 Pre-Scram 설정치인 16.0 MPa를 초과하게 됨으로써 주입되는 제어봉 반응도의 삼입과 16.0 MPa 이하에서 인출되는 제어봉 반응도의 인출이 반복됨으로써 발생하게 된다. 그러나 수행된 성능 해석에 의하면 MCP 1대가 정지된 75% 출력 운전 및 75% ↔ 20% 출력 변화시에서 가압기 압력은 고압/저압 원자로 정지 설정치 허용 기준(고압은 17.0 MPa, 저압은 12.0 MPa)이내에서 유지되는 것으로 나타났다.

일차 계통 증기발생기 입/출구 온도는 그림 10에 나타내었다. 일차 계통 증기발생기 입구 온도는 일차 계통의 유량 감소로 인해 과도 초기부터 증가하며, 약 40초부터 증기발생기를 통하여 과냉각된 냉각수가 시간 지연되어 유입됨으로써 증기발생기 입구 온도는 감소하기 시작한다. 이에 반하여 증기발생기 일차측 출구 온도는 과도 초기에 감소하게 되는데, 이는 노심에서의 열량과 증기발생기를 통하여 방출되는 열량의 비교를 통하여서 파악될 수 있다. 그림 8에 의하면 해석 초기에 증기발생기를 통하여 방출되는 열량이 노심에서 발생하는 열량에 비하여 크기 때문에 일차측 출구 온도는 감소하게 되며, 시간 지연 효과가 나타나게 되어 해석 초기부터 약 20초간 출구 온도가 감소하는 것으로 분석되었다. 이후 노심에서 발생하는 열량이 증기발생기를 통하여 방출되는 열량에 비하여 크기 때문에 증기발생기 출구 온도는 증가하게 되며, 열평형이 이루어지는 약 350초부터 증기발생기 일차측 출구 온도는 안정화된다. 75% ↔ 20% 출력 변화시에는 출력 제어 논리가 증기발생기 일차측 입구 온도를 일정하게 하는 Constant T_{ref} 를 사용하기 때문에, 증기발생기 일차측 출구 온도가 증가하게 된다. 언급된 바와 같이 노심 출력이 20% 근방으로 줄어들게 되면 가압기 압력이 Pre-Scram 설정치를 초과하게 되어 제어봉의 긴급 삼입이 이루어지게 되어 노심 출력 및 계통 압력이 급격하게 변하는데, 이러한 이유로 출력 변화시 증기발생기 일차측 입/출구 온도가 진동하게 된다. 이후 출력이 증가하여 75% 수준에서 유지되면 증기발생기 입/출구 온도는 일정하게 유지되지만, 다소 증가하는 것으로 분석되었다.

그림 11 및 12는 증기발생기 이차측 출구에서의 온도 및 노심 노드에서의 냉각재의 평균 온도를 보여주고 있다. 그림 11에서 나타났듯이 100% 정상 출력하에서는 약 40K 정도의 과열도를 가지는데, 과도 기간중에는 초기 시점을 제외하고는 약 40K 이상의 과열도를 지속적으로 가지는 것으로 분석되었다. 그리고 비정상 출력 운전하에서 허용 기준중 하나는 노심에서 냉각재 비등이 허용되지 않는 것인데, 그림 12에서도 알 수 있듯이 수행된 성능 해석 결과에 의하면 노심 노드에서의 냉각재의 평균 온도는 포화 온도에 비하여 꽤 낮은 것으로 계산되었기 때문에 노심 노드에서

냉각재 비등이 발생하지 않을 것으로 판단할 수 있다.

수행된 성능 해석 결과에 의하면 MCP 1대 정지시 75% 출력 운전 및 75% ↔ 20% 출력 변화시 어떤 계통 변수도 원자로 정지 신호를 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 그러나 75% ↔ 20% 출력 변화시 노심 출력이 20%까지 줄어드는 경우 가압기 압력이 Pre-Scram 설정 압력을 초과하게 되어 주요 계통 변수들이 지속적으로 진동하는 현상이 나타났다.

나. MOC 및 EOC 조건하에서 MCP 1대 정지 운전

MOC 및 EOC 조건하에서도 MCP 1대 정지 운전에 대한 성능 해석이 수행되었는데, 각 조건에서의 차이는 지발 중성자 분율, 축방향 출력 분포, 핵연료 온도 계수, 냉각재 밀도 계수, 제어봉가 및 제어봉의 초기 위치이다[5,6]. 언급된 항목들 중 중성자 분율 및 제어봉의 초기 위치는 표 2에 나타내었으며, 나머지 항목들은 그림 13에서 그림 16에 나타내었다. 수행된 해석 결과를 그림 17에서 19에 나타내었는데, 각 조건하에서 주요 계통 변수들의 차이는 존재하지만 BOC 조건과 거의 비슷한 경향을 보이는 것으로 해석되었다. 그리고 75% 출력 운전 및 75% ↔ 20% 출력 변화시 어떤 계통 변수도 원자로 정지 신호를 발생하지 않는 것으로 분석되었으며, BOC 조건과 마찬가지로 20% 출력하에서 가압기 압력에 의한 Pre-Scram 신호는 지속적으로 발생하는 것으로 계산되었다.

4. 결론

SMART MCP 1대 정지 운전시 SMART의 전반적인 계통 변수들을 분석하고, SMART의 계통 변수들이 허용 기준 이내에서 유지될 수 있는지 여부를 파악하기 위하여 TASS/SMR 코드를 이용하여 성능 해석을 수행하였다. 성능 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 100% 출력의 BOC 조건을 이용한 성능 해석 결과에 의하면 MCP 1대 정지시 75% 출력 운전 및 75% ↔ 20% 출력 변화시 어떤 계통 변수도 원자로 정지 신호를 발생하지 않는 것으로 분석되었다.
- 75% ↔ 20% 출력 변화 운전에서 노심 출력이 20%까지 줄어드는 경우 가압기 압력이 Pre-Scram 설정 압력(16.0 MPa)을 초과하는 것으로 나타났으며, 제어봉의 긴급 삽입 및 인출에 의해 노심 출력, 가압기 압력 등과 같은 주요 계통 변수들이 지속적으로 진동하는 것으로 분석되었다.
- MOC 및 EOC 조건하에서 수행된 MCP 1대 정지 운전에 대한 성능 해석 결과에 의하면, BOC 조건과 마찬가지로 주요 계통 변수들은 허용 기준을 초과하지 않는 것으로 분석되었다.

그리고 가압기 압력 및 노심 출력과 같은 주요 계통 변수들의 경향은 BOC 조건에서의 경향과 비슷한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 증장기 개발 계획의 일환으로 수행된 것이다.

참고 문헌

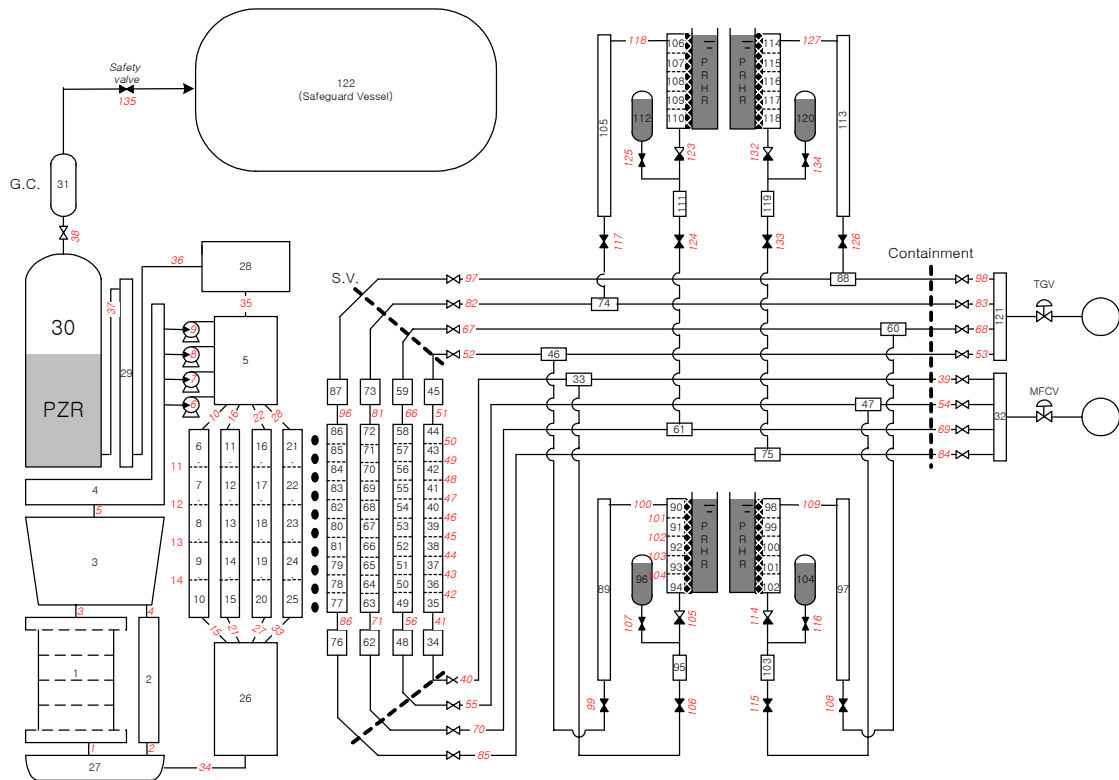
1. SMART-FS-DD012, Revision 01, SMART 과도기 및 제한사고 해석을 위한 유체계통설계자료, 한국원자력연구소, 2000.
2. KAERI/TR-845/97, TASS 코드 특정 기술 보고서, 한국원자력연구소, 1996.
3. SMART-SA-CA530-18, Revision 00, SMART 기본설계의 성능/안전해석을 위한 정상상태 계산서, 한국원자력연구소, 2001.
4. KAERI/TR-1798/2001, SMART 성능해석 방법론, 한국원자력연구소, 2001.
5. SMART-CA-DD190-01, Revision 02, SMART Core Design/Analyses Technology Development, 한국원자력연구소, 2001.
6. SMART-SA-CA530-17, Revision 00, SMART 기본설계의 성능/안전해석을 위한 TASS/SMR 원자로 동특성 및 반응도 입력 계산서, 한국원자력연구소, 2001.

표 1. SMART 예비 보호 및 정지 설정치

	정격 설계값	설정치	
		예비보호	정지
노심 열출력, %		↑ 108	↑ 115
SG 일차측 입구 온도, °C	310	↑ 325	↑ 335
가압기 압력, MPa	15.0		↓ 12
		↑ 16	↑ 17.0
SG 증기압, MPa	3.3		↑ 4

표 2. 각 조건하에서 지발중성자 비율, 붕괴 상수 및 제어봉 위치

		BOC	MOC	EOC
지발중성자 비율	1	0.0003190	0.0001759	0.0001759
	2	0.0018595	0.0011836	0.0011836
	3	0.0016868	0.0010507	0.0010507
	4	0.0036931	0.0022077	0.0022077
	5	0.0012758	0.00083	0.00083
	6	0.0002917	0.0002024	0.0002024
붕괴상수 (sec ⁻¹)	1	0.012742	0.012792	0.012792
	2	0.031771	0.0315	0.0315
	3	0.118083	0.122671	0.122671
	4	0.315926	0.32452	0.32452
	5	1.401946	1.404395	1.404395
	6	3.914359	3.805249	3.805249
제어봉 위치 (Step)		510	577	263



Nodalization of TASS/SMR for SMART

그림 1. SMART 성능 해석을 위한 Nodalization

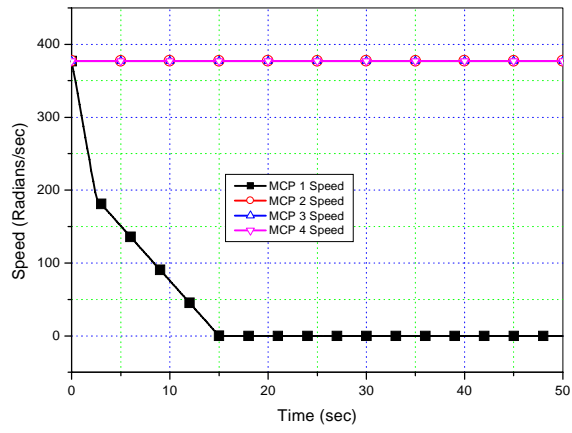


그림 2. MCP 속도 변화

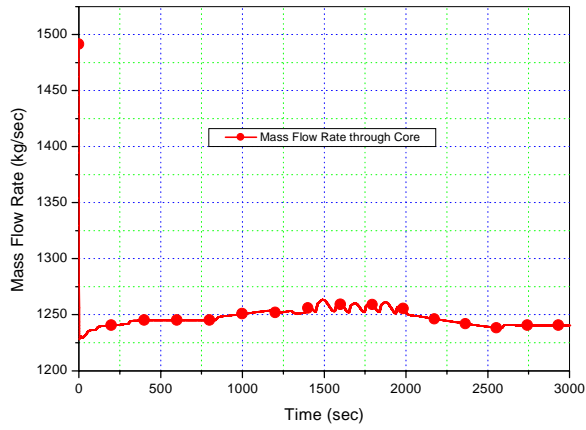


그림 3. 노심 유량의 변화

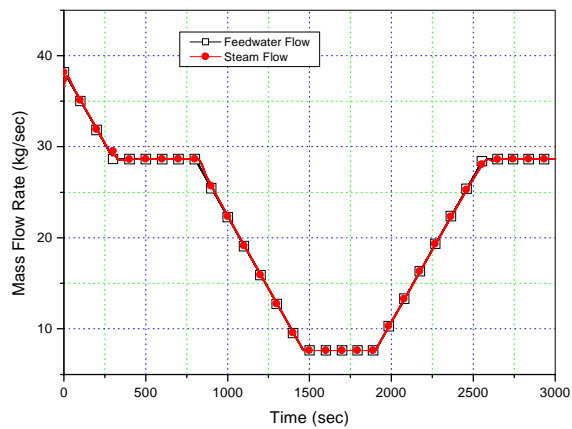


그림 4. SG 이차측 입/출구 유량 변화

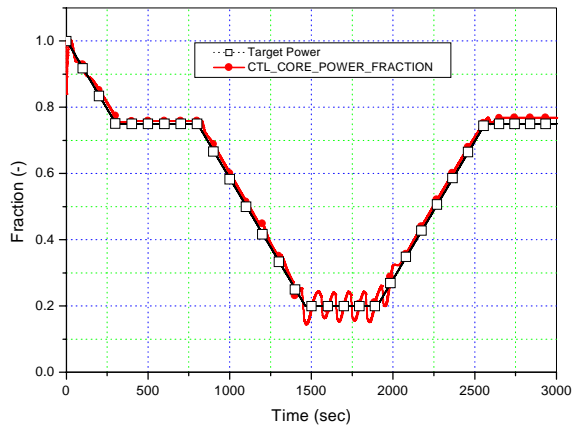


그림 5. 목표 출력 및 노심 출력

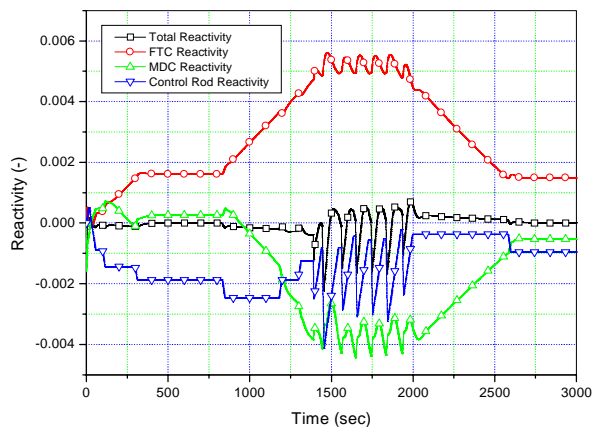


그림 6. 반응도의 변화

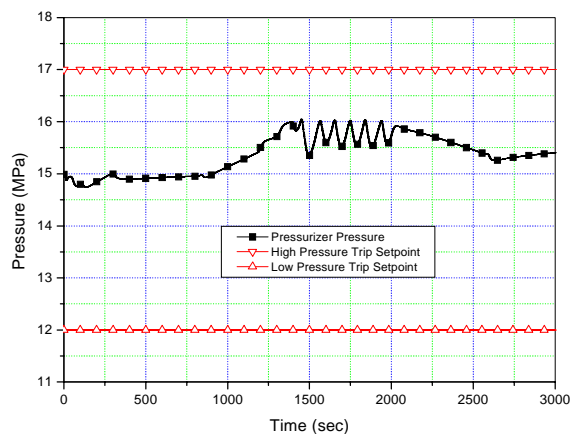


그림 7. 가압기 압력 변화

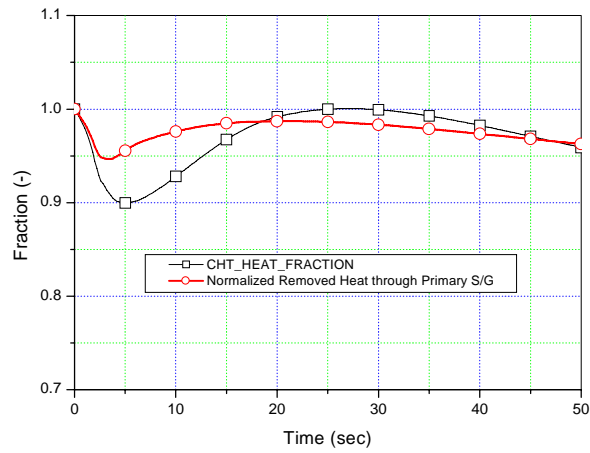


그림 8. 과도 초기 노심 평균 열유속비와 SG를 통하여 방출되는 전열량비

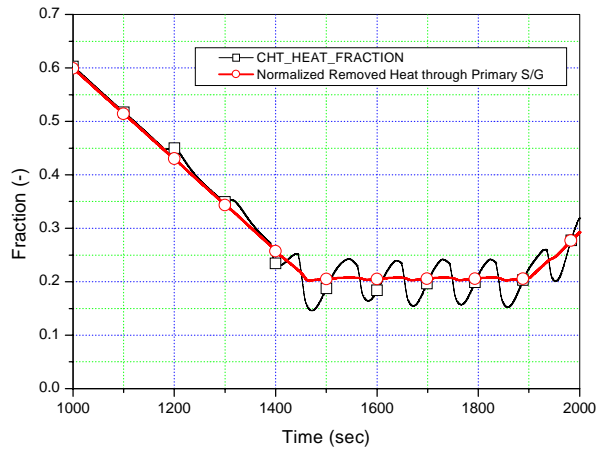


그림 9. 75%→20% 출력 변화시 노심 평균 열유속비와 SG를 통하여 방출되는 전열량비

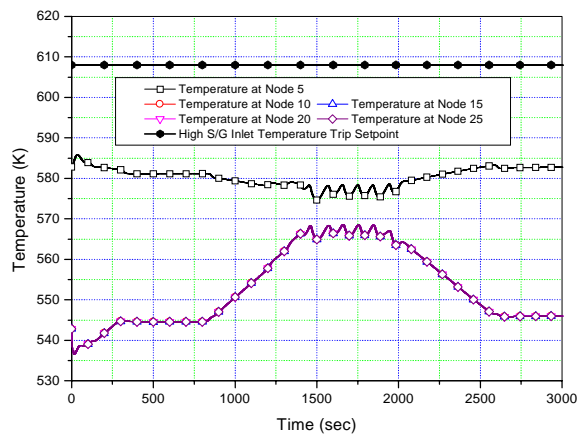


그림 10. SG 일차측 입/출구 온도 변화

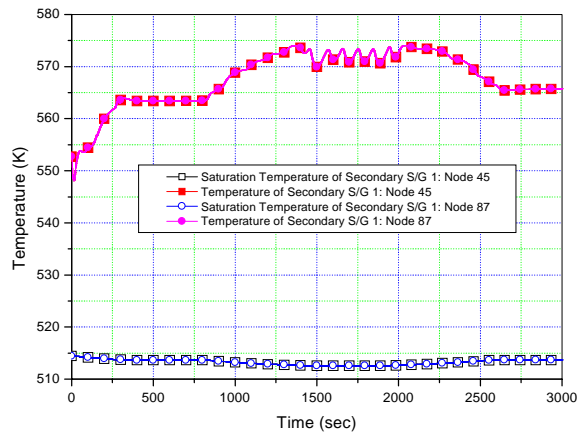


그림 11. SG 이차측 출구에서의 온도

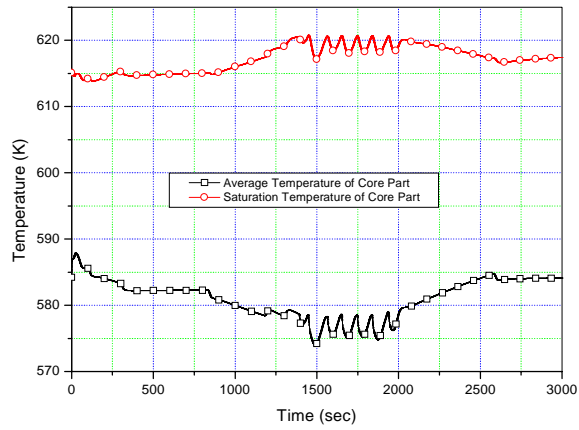


그림 12. 노심에서의 냉각재 평균 온도 및 포화 온도

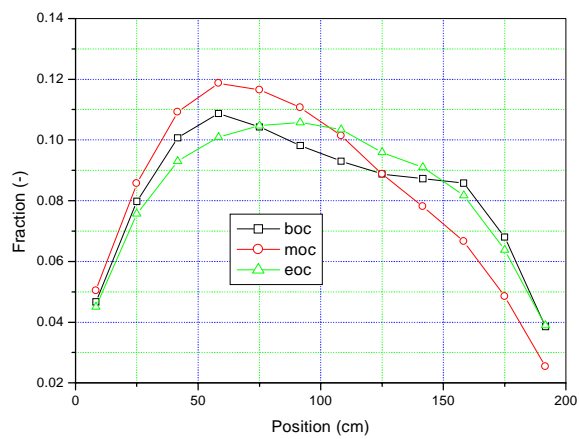


그림 13. 축방향 열출력 분포

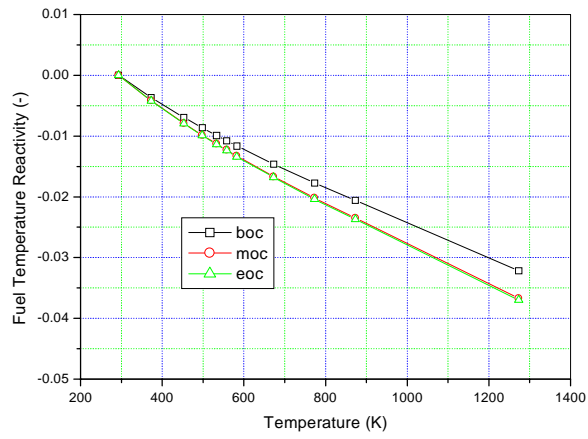


그림 14. 핵연료 온도 계수

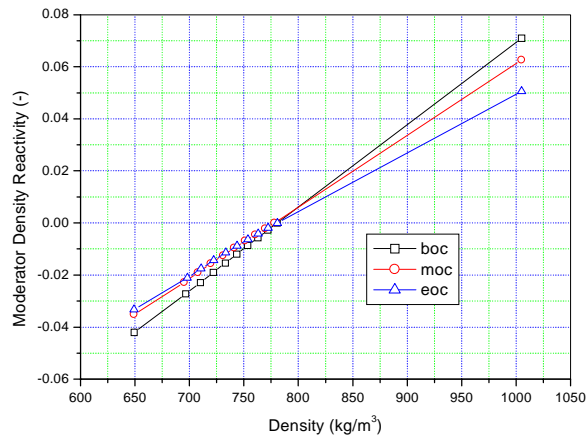


그림 15. 냉각재 밀도 계수

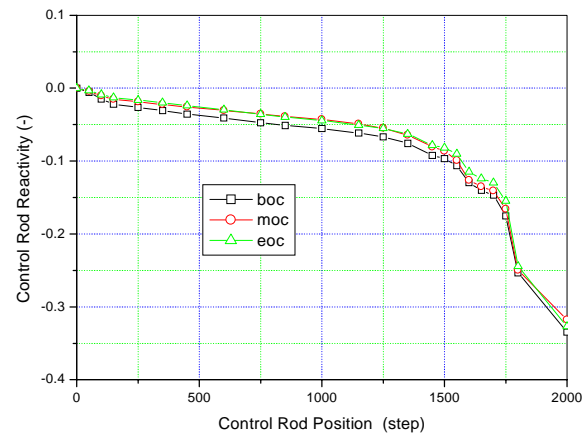


그림 16. 제어봉 위치에 따른 제어봉가

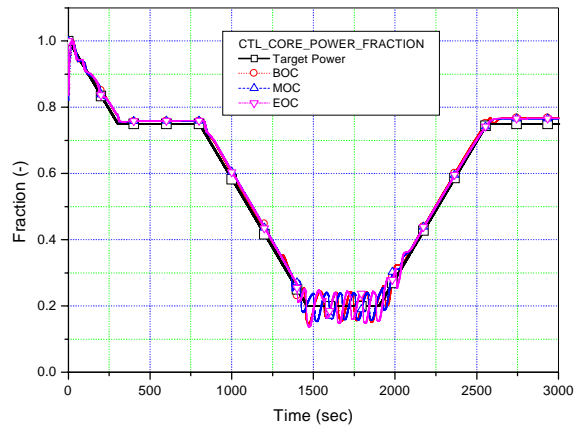


그림 17. 목표 출력 및 노심 출력

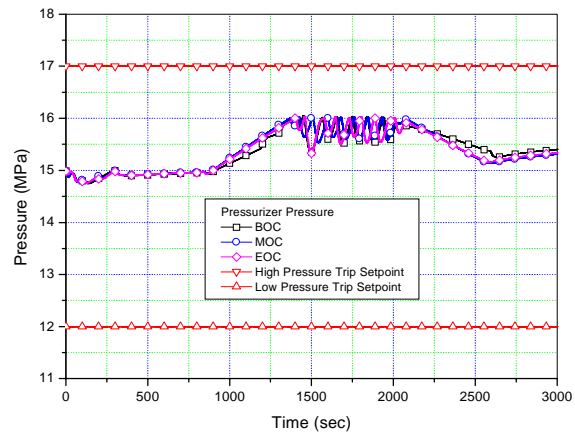


그림 18. 가압기 압력 변화

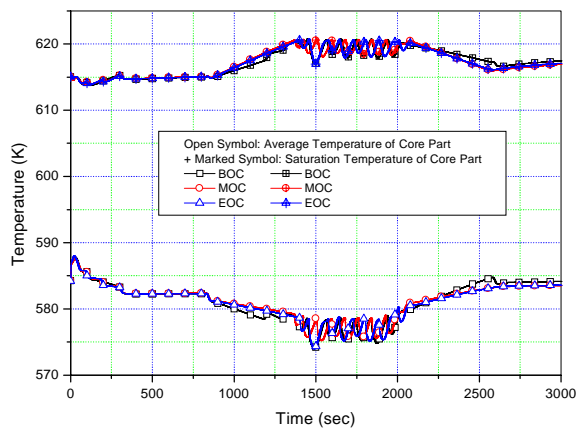


그림 19. 노심에서의 냉각재 평균 온도 및 포화 온도