

SMART 정지불능예상과도상태 사고 해석

Safety Analyses on SMART Anticipated Transient Without Scram

양수형, 김희철, 장문희

동력로기술개발팀
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

TASS/SMR 코드를 이용하여 SMART 일체형원자로에서 발생 가능한 정지불능예상과도상태에 대한 안전 해석을 수행하였고, 정지불능예상과도상태 사고시 SMART 일체형원자로가 안전 해석 허용 기준을 만족하는지 여부를 평가하였다. 해석에서 고려된 정지불능예상과도상태 초기 사건은 급수 유량 상실 사건, 단일 제어봉집합체 인출 사건 및 제어봉집합체군 인출 사건이며, 초기 조건은 주기초, 주기중 및 주기말 100% 정격 출력 조건이다. 해석 결과에 의하면 언급된 네 가지 초기 사건들중 제어봉집합체군 인출 사건 발생시 일차 계통의 압력은 가장 높은 것으로 나타났으나, 허용 기준인 22.06 MPa에 대해서는 여유도를 가지는 것으로 분석되었다.

Abstract

With TASS/SMR code, safety analyses have been performed on the ATWS(anticipated transient without scram), which is possible to occur in SMART, to identify whether or not SMART satisfies acceptable criteria in ATWS condition. Initiating events considered in safety analyses are loss of feedwater flow, single control rod assembly withdrawal and control rod assembly bank withdrawal. 100% rated core power of beginning of core, middle of core and end of core are established as initial condition. According to analyses results, primary pressure resulted from control rod assembly bank withdrawal event is higher than those resulted from other 2 initiating events. However, there seems to be pressure margin in comparison with pressure criteria on the ATWS, 22.06 MPa.

1. 서론

설계기준초과사고로 선정된 정지불능 예상과도상태(Anticipated Transients Without Scram; ATWS) 사고는 급수유량상실사건, 복수기진공상실사건, 혹은 소외전원상실사건 등과 같은 예상운전과도시에 원자로가 정지되어야 할 조건임에도 정지되지 않는 사고이다[1]. ATWS 사고는 발생 확률은 낮으나 노심의 반응도 제환에 따라서 사고 결말은 원자로 압력 경계 및 노심 손상을 초래할 가능성이 매우 높기 때문에 SMART의 안정성 확보 측면에서 중요도가 높은 사고이며, 규제측면에서도 ATWS 사고에 대비한 다양성 보호 계통(Diverse Protection System; DPS)을 요구하고 있다[2]. 이러한 이유로 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)에서는 ATWS 사고의 위험도를 낮추기 위하여 다양성 및 독립성을 갖춘 가압기 고압력 정지 설정치를 가지는 다양성 보호 계통을 설치하였는데, DPS는 원자로 보호 계통과는 완전히 분리된 계측기 및 신호 처리 장치에 의하여 구성된다[3].

본 논문에서는 ATWS 관련 초기 사건들 중 급수유량상실사건(Loss Of Feed Water; LOFW)와 부주의한 제어봉집합체 인출 사건과 같은 보통 빈도를 가지는 초기 사건에 대한 최적 해석을 수행하여, 100% 정격 출력 조건에서 ATWS 사고가 발생하는 경우 SMART가 안전 해석 허용 기준을 만족하는지 여부를 평가하였다.

2. 해석 방법

가. 사고 원인 및 개요

ATWS 사고의 초기 사건으로 계통의 압력이 증가하는 대표적인 사건인 LOFW와 부주의한 제어봉집합체 인출 사건을 선정하였으며, 각 초기 사건들의 원인은 표 1에 나타내었다. 초기 사건이 LOFW시에는 사건 원인이 과도 초기에 즉각적으로 발생하는 것으로 가정하였다. 그리고 초기 사건이 부주의한 제어봉집합체 인출 사건시에는 인출 반응도가 다양하기 때문에 사건을 단일 제어봉집합체 인출 사건과 제어봉집합체군 인출 사건으로 분류하여 해석을 수행하였다. 단일 제어봉집합체 인출 사건 해석에서는 반응도 인출량이 크게 되도록 설정하였으나, 제어봉집합체군 인출 사건 해석에서는 표 2 및 그림 1에 보이는 것처럼 주기초 조건에서 최적 추정 전체 반응도 인출량 및 인출 속도를 고려하였다[4].

언급된 세 가지 사건들의 원인이 발생하여 원자로 보호 계통(Reactor Protection System; RPS)의 주요 변수들이 원자로 정지 설정치에 도달하게 되면 원자로 정지 신호가 발생하게 되지만, ATWS 사고시에는 원자로 정지 신호의 오류로 인하여 원자로 비상 정지가 이루어지지 않게 된다. 일차 계통과 이차 계통사이의 열평형이 이루어지지 않아 일차 계통의 압력은 계속 증가하게 되며,

일차 계통의 압력이 DPS의 가압기 고압력 정지 설정치에 도달하게 되면 자동으로 원자로 비상 정지 신호가 발생하게 된다. 원자로 정지 신호에 의해 주급수관/주증기관 격리밸브는 폐쇄되고, 피동잔열제거계통 격리밸브는 개방된다. 격리밸브의 폐쇄 및 개방이 완전히 이루어진 이후 원자로의 냉각은 피동잔열제거계통을 통한 자연 대류에 의해 이루어지면서 계통은 안정한 상태를 유지하게 된다.

나. 안전 제한치 및 허용 기준

ATWS 사고시 적용되는 일반적인 허용 기준은 과도 기간중 계통의 압력이 ASME Service Level C 압력인 22.06 MPa(3200 psia)를 초과하지 않아야 한다는 것이다[5].

다. 해석 방법 및 해석 모델

ATWS 사고시 원자로의 열수력적 거동을 해석하기 위하여 TASS/SMR 코드를 사용하였으며, 사고 해석을 위하여 사용된 Nodalization을 그림 2에 나타내었다. ATWS 사고는 설계기준 초과 사고로서 최적 해석을 수행하기 때문에, 사건 해석 초기 조건은 출력 분포가 주기초, 주기중 및 주기말인 전출력 운전(100%) 상태이다.

ATWS 사고를 위한 DPS는 비안전 계통으로 관련된 원자로 정지 설정치와 신호 지연 시간 및 원자로 정지 신호 지연 시간과 같은 응답 시간들이 현재 설계 상태에서 아직 확정되어 있지 않다. 따라서 본 해석에서는 DPS 관련 가압기 고압력 정지 설정치는 민감도 분석을 통해서 결정하기로 하였으며, 신호 지연 시간 및 원자로 정지 신호 지연 시간을 각각 0.975초와 1.475초로 가정하였다 [6, 7]. 그리고 피동잔열제거계통을 포함한 이차계통의 밸브들의 개폐 시간은 10초를 가정하여 해석에서 이용하였다. 이와 더불어 3개의 가압기 안전밸브중 한 개의 안전밸브는 고장에 의해 작동되지 않고, 원자로 정지시 가장 큰 반응도가를 가지는 제어봉집합체가 고착되어 작동하지 않는 것으로 가정하였다. 또한 비안전 전원 계통의 상실을 추가적으로 가정하였는데, 비안전 전원 계통이 상실되면 주냉각재펌프는 그림 3에 보이는 것처럼 관성 서행(Coastdown)하게 된다.

반응도가와 관련해서는 LOFW시에는 냉각재밀도계수 및 핵연료온도계수를 Least Negative 값 및 Most Negative 값을 이용하였다. 이에 반하여 부주의한 제어봉 인출 사건시에는 냉각재밀도계수 및 핵연료온도계수를 Least Negative 값을 이용하였다.

3. 해석 결과

가. DPS 가압기 고압력 정지 설정치에 대한 민감도 분석

DPS 가압기 고압력 정지 설정치를 파악하기 위하여 우선적으로 초기 사건이 제어봉집합체군 인출 사건에 대한 해석을 수행하였다. 이는 다른 초기 사건들에 비하여 제어봉집합체군 인출 사건 시 노심에서 발생하는 열량과 이차측을 통하여 제거되는 열량 사이의 차이가 가장 커서 일차 계통의 가압 관점에서 가장 심각한 결과를 초래하기 때문이다. 주기초 조건하에서 제어봉집합체군 인출 사건을 이용하여 DPS 관련 가압기 고압력 설정치를 결정하기 위한 민감도 분석을 수행하였으며, 결과를 그림 4에 나타내었다. 가압기 고압력 정지 설정치로 18.0 MPa 이상을 이용하는 경우 허용 기준을 만족하지 못하거나, 허용 기준 압력에 대한 여유도가 크지 않은 것으로 분석되었다. 이에 반하여 17.8 MPa 이하의 압력을 가압기 고압력 정지 설정치로 이용하는 경우 일차 계통의 압력은 22 MPa 이내에서 유지되고, 허용 기준 압력에 대한 여유도 또한 가지는 것으로 분석되었다. 주기중 조건 및 주기말 조건에서도 가압기 고압력 설정치 관련 민감도 분석이 수행되었는데, 주기초와 비슷한 압력 경향을 보인다.

추가적으로 초기 사건이 LOFW 및 단일 제어봉집합체 인출 사건에 대하여 DPS 가압기 고압력 정지 설정치에 대한 민감도 분석 또한 수행하였다. 단일 제어봉집합체 인출 사건시에 가압기 고압력 설정치에 따라서 원자로 정지 신호의 발생 여부가 차이 나는 것으로 분석되었는데, 가압기 고압력 정지 설정치로 17.8 MPa를 설정하는 경우에는 가압기 안전 밸브의 작동으로 원자로 정지 신호가 발생하지 않았다. 이에 반하여 가압기 고압력 정지 설정치로 17.7 MPa를 이용하는 경우에는 DPS에 의한 원자로 정지 신호가 발생하게 된다(그림 5). 따라서 본 사고 해석에서는 RPS 가압기 고압력 정지 설정치(17.0 MPa) 및 허용 기준 압력에 대한 여유도 등을 감안하여 DPS 관련 가압기 고압력 설정치로 17.7 MPa를 이용하였다.

나. 해석 결과

1) LOFW와 동반된 ATWS

초기 사건이 LOFW인 ATWS에 대한 주기초 조건에서의 사건 진행 상황을 표 3에 요약하였으며, 주요 결과를 그림 6과 7에 나타내었다. 주기별 노심 출력의 변화를 그림 6에 나타내었는데, 과도 초기부터 급수 유량이 상실되어 일차 계통의 온도가 상승하므로 냉각재 밀도는 감소하게 된다. 이에 따라 노심 출력은 감소하게 되지만, 이차 계통을 통한 급수 유량이 존재하지 않기 때문에 원자로 계통에서의 생성 열량과 이차 계통을 통한 제거 열량의 차이로 인해 가압기 압력은 계속적으로 증가하게 된다. 가압기 압력이 RPS 가압기 고압력 정지 설정치인 17.0 MPa에 도달하면 원자로 정지 신호가 발생하지만 원자로 정지는 이루어지지 않게 되어 원자로 계통에서의 생성 열량과 이차 계통을 통한 제거 열량의 차이로 인해 가압기 압력은 계속적으로 증가하게 된다(그림 7). 이

후 가압기 압력이 DPS 가압기 고압력 정지 설정치인 17.7 MPa에 도달하게 되면 원자로 정지가 이루어지며, 냉각재 반응도 및 정지 제어봉집합체군의 반응도 조합에 의해 노심 출력이 줄어들게 된다. 이와 더불어 피동잔열제거계통을 통한 열제거가 가능해져서 일차 계통의 압력 또한 감소하게 된다. 분석 결과에 의하면 주기초 조건에서 일차 계통의 압력이 가장 높은 것으로 분석되었는데, 이는 노심에서 발생하는 열량과 증기발생기를 통한 제거 열량의 차이가 주기초 조건에서 가장 크기 때문이다. 이와 더불어 모든 주기에 대하여 일차 계통의 압력은 허용 기준 압력인 22.06 MPa 이하에서 유지되었다.

2) 부주의한 제어봉집합체 인출 사건과 동반된 ATWS

초기 사건이 제어봉집합체군 인출 사건인 ATWS에 대한 주기초 조건에서의 사건 진행 상황을 표 4에 요약하였으며, 주요 결과를 그림 8과 9에 나타내었다. 주기별 노심 출력의 변화를 그림 8에 나타내었는데, 과도 초기부터 정(+)의 값을 가지는 제어봉집합체군 반응도 인출로 인해 노심 출력은 증가하게 된다. 노심 출력이 원자로 정지 설정치인 115%에 도달하면 원자로 정지 신호가 발생하나 원자로 정지는 이루어지지 않고, 원자로 계통에서의 생성 열량과 이차 계통을 통한 제거 열량의 차이로 인해 가압기 압력은 계속적으로 증가하게 된다(그림 9). 이후 가압기 압력이 DPS 가압기 고압력 정지 설정치인 17.7 MPa에 도달하게 되면 원자로 정지가 이루어지며, 냉각재 반응도 및 정지 제어봉집합체군의 반응도 조합에 의해 노심 출력이 줄어들게 된다. 이와 더불어 피동잔열제거계통을 통한 열제거가 가능해져서 일차 계통의 압력은 감소하게 된다. 분석 결과에 의하면 주기초 조건에서 일차 계통의 압력이 가장 높은 것으로 분석되었는데, 이는 노심에서 발생하는 열량과 증기발생기를 통한 제거 열량의 차이가 주기초 조건에서 가장 크기 때문이다. 이와 더불어 모든 주기에 대하여 일차 계통의 압력은 허용 기준 압력인 22.06 MPa 이하에서 유지되었다.

초기 사건이 단일 제어봉집합체 인출 사건인 ATWS에 대한 주기초 조건에서의 사건 진행 상황을 표 5에 요약하였으며, 주요 결과를 그림 10과 11에 나타내었다. 주기별 노심 출력의 변화를 그림 10에 나타내었는데, 제어봉집합체군 인출 사건과 유사한 계통 경향을 보이나 노심 출력이 덜 증가하기 때문에 가압기 압력은 제어봉집합체군 인출 사건에 비해 낮은 것으로 분석되었다. 분석 결과에 의하면 주기말 조건에서 일차 계통의 압력이 가장 높은 것으로 분석되었으나, 허용 기준 압력인 22.06 MPa 이하에서 유지되었다.

3) ATWS 민감도 분석

핵연료온도계수 및 냉각재밀도계수가 SMART에 미치는 영향을 파악하기 위하여 민감도 분석을 수행하였으며, 주기초 조건에서의 해석 결과를 그림 12 및 13에 나타내었다. 그림 12는 초기 사건이 LOFW인 ATWS에 대한 결과를 보여주고 있는데, LOFW시에는 과도 초기 냉각재 온도는

증가하지만 핵연료 온도는 감소하기 때문에, 기본 경우로 고려한 핵연료온도계수는 Most Negative 값을 냉각재온도계수는 Least Negative 값을 사용하는 경우 일차 계통의 압력이 가장 높은 것으로 나타났다. 그림 13은 초기 사건이 제어봉집합체군 인출 사건인 ATWS 결과를 보여주고 있는데, 과도 초기 제어봉집합체군의 인출로 인하여 핵연료 온도 및 냉각재 온도가 증가하게 된다. 따라서 기본 경우로 고려한 Least Negative 값을 사용하는 경우 일차 계통의 압력이 가장 높은 것으로 나타났다. 핵연료온도계수 및 냉각재밀도계수를 Most Negative 값을 이용하는 경우에 일차 계통의 최대 압력은 기본 경우에 비하여 3 MPa 정도 낮은 것으로 분석되었다.

이와 더불어 초기사건이 제어봉집합체군 인출 사건시 정지제어봉집합체의 정지 제어봉가 및 가압기 안전 밸브의 개방 정도에 따른 민감도 분석 또한 수행되었는데, 정지 제어봉집합체가 삽입되지 않는 경우에는 가압기 안전밸브가 3개 다 개방되더라도 일차 계통의 압력이 허용 기준인 22.06 MPa를 초과하는 것으로 분석되었다(그림 14).

4. 결론

SMART 일체형원자로에서 100% 정격 출력 운전시 발생 가능한 ATWS에 대하여 TASS/SMR 코드를 이용하여 안전 해석을 수행하였다. 해석에서 고려된 ATWS 초기 사건으로는 LOFW와 부주의한 제어봉집합체 인출 사건이다. 해석을 통하여 파악된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 다양성 보호 계통의 가압기 고압력 정지 설정치를 파악하기 위하여 세 가지 초기 사건들에 대해 해석을 수행한 결과, 18.0 MPa 이하의 설정치를 가지는 경우 허용 기준에 대해 여유도를 가지는 것으로 분석되었다. 이와 더불어 모든 초기 사건 발생시에 원자로가 정지되기 위해서는 DPS 관련 가압기 고압력 정지 설정치로 17.7 MPa 이하의 값이 사용되어야 한다. 추후 SMART 설계 변경시 DPS 가압기 고압력 정지 설정치를 파악하기 위해서는 추가적인 해석이 이루어져야 할 것이다.
- ATWS 사고 해석에서 가장 심각한 결과를 초래하는 초기 사건은 제어봉집합체군 인출 사건이다. 제어봉집합체군 인출 사건 발생시 일차 계통의 최고 압력은 약 21 MPa까지 증가하지만, 허용 기준인 22.06 MPa에 대해서는 여유도를 가지는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 증장기 개발 계획의 일환으로 수행된 것이다.

참고 문헌

1. KAERI/CM-425/2000, 일체형원자로 안전해석기술개발; 일체형원자로 안전현안 평가, 한국원자력연구소, 2001.
2. 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙: 27조 다양성보호계통, 과학기술부령 제 31호.
3. SMART-FS-IC300, Revision 00, Functional Control Logic Diagram for SMART, 한국원자력연구소, 2000.
4. SMART-CA-DD190-01, Revision 02, Basic Core Design Data for SMART, 한국원자력연구소, 2001.
5. BNFL New Reactor Study: System 80+TM Standard Design(Key Issue Paper on Reactor Shutdown; ATWT and Return to Power), ABB Combustion Engineering, 1992.
6. SMART-FS-DD012, Rev. 01, SMART 과도기 및 제한사고 해석을 위한 유체계통설계자료, 한국원자력연구소, 2000.
7. SMART-MM-DD200-00, Rev. 01, SMART 안전해석을 위한 MMIS 설계자료, 한국원자력연구소, 2000.

표 1. 초기 사건의 원인

사건	원인
LOFW	급수 격리 밸브 폐쇄(Stroking Time = 0.0)
부주의한 제어봉 인출 사건	1018 pcm 3초간 선형적으로 인출
	그림 2

표 2. Nominal CEA Worth for all CEA Bank

TTD(cm)	Bank Position(cm)				Rod Worth (pcm)		
	R4	R3	R2	R1	BOC	MOC	EOC
0	200	200	200	200	0.0	0.0	0.0
20	180	200	200	200	559.0	422.0	347.5
40	160	200	200	200	1483.6	1052.9	865.4
60	140	200	200	200	2196.2	1536.6	1292.9
80	120	180	200	200	2632.7	1870.5	1623.5
100	100	160	200	200	3087.1	2224.1	1985.8
120	80	140	200	200	3536.7	2597.8	2401.2
128	72	132	192	200	3757.5	2773.4	2619.7
140	60	120	180	200	4088.6	3036.9	2947.4
160	40	100	160	200	4734.2	3528.7	3594.2

(TTD 128 cm는 100% 노심 출력시 주기초 제어봉집합체군의 위치이며, Interpolation한 값임)

표 3. LOFW와 관련된 ATWS 사고시 사건 진행(주기초)

시간 (초)	사건	설정치 또는 수치
0	급수 유량 상실 RPS 저급수 유량 정지 설정치에 도달	- 정격 유량의 10% (Unsuccessful)
10.988	RPS 가압기 고압력 정지 설정치에 도달	17.0 MPa (Unsuccessful)
13.54	DPS 가압기 고압력 정지 설정치에 도달	17.7 MPa
14.515	주급수/주증기 격리밸브 닫힘 PRHR 격리밸브 열림 주냉각재펌프 관성 서행 시작	10초 Stroking Time 10초 Stroking Time 40초 관성 서행 시간
15.015	제어봉 삽입 시작	-
15.1	일차 계통 최대 압력에 도달	18.20 MPa
54.515	주냉각재펌프 정지	-

표 4. 제어봉집합체군 인출 사건과 관련된 ATWS 사고시 사건 진행(주기초)

시간 (초)	사건	설정치 또는 수치
0	제어봉집합체군 인출 시작	그림 2
0.9125	노심 고출력 정지 설정치에 도달	115 % (Unsuccessful)
15.0075	DPS 가압기 고압력 정지 설정치에 도달	17.7 MPa
16.0	노심 최대 출력에 도달	정격 조건의 263%
15.9325	주급수/주증기 격리밸브 닫힘 PRHR 격리밸브 열림 주냉각재펌프 관성 서행 시작	10초 Stroking Time 10초 Stroking Time 40초 관성 서행 시간
16.4325	제어봉 삽입 시작	-
21.6	일차 계통 최대 압력에 도달	20.57 MPa
56.1925	주냉각재펌프 정지	-

표 5. 단일 제어봉집합체 인출 사건과 관련된 ATWS 사고시 사건 진행(주기초)

시간 (초)	사건	설정치 또는 수치
0	제어봉집합체군 인출 시작	3초간 1018 pcm 인출
0.357	노심 고출력 정지 설정치에 도달	115 % (Unsuccessful)
15.185	DPS 가압기 고압력 정지 설정치에 도달	17.7 MPa
3.0	노심 최대 출력에 도달	정격 조건의 219%
16.16	주급수/주증기 격리밸브 닫힘 PRHR 격리밸브 열림 주냉각재펌프 관성 서행 시작	10초 Stroking Time 10초 Stroking Time 40초 관성 서행 시간
16.66	제어봉 삽입 시작	-
16.9	일차 계통 최대 압력에 도달	17.97 MPa
56.16	주냉각재펌프 정지	-

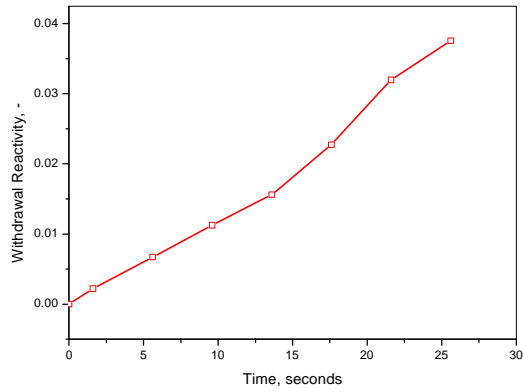
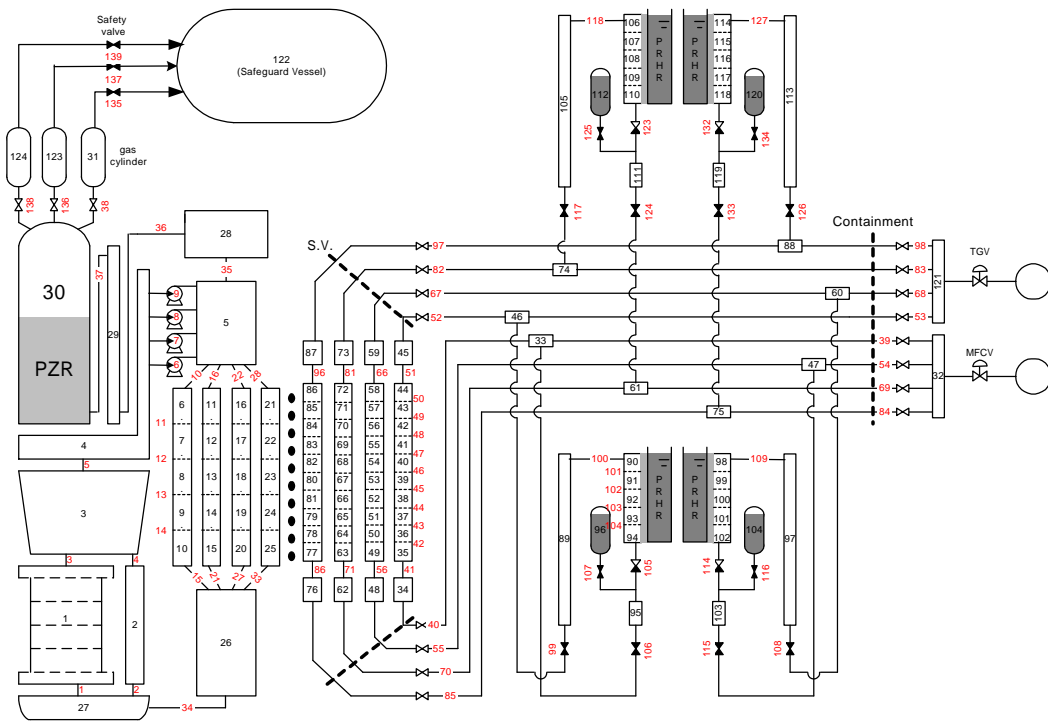


그림 1. 시간에 따른 제어봉집합체군 반응도 인출량



Nodalization of TASS/SMR for SMART

그림 2. 안전 해석을 위한 SMART Nodalization

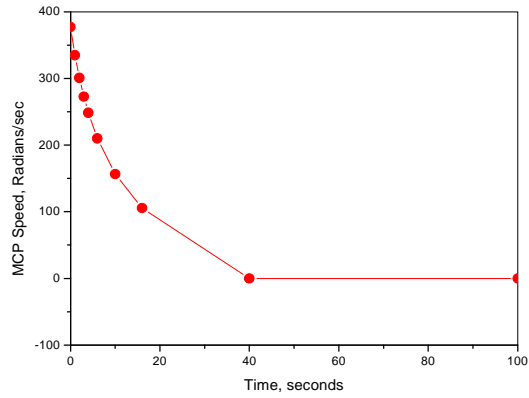


그림 3. 주냉각재펌프 관성 서행 곡선

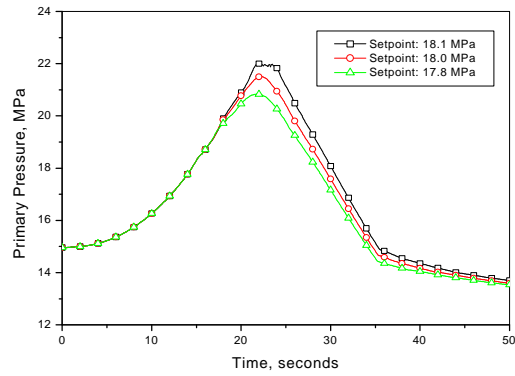


그림 4. 가압기 고압력 정지 설정치에 따른 일차 계통의 압력

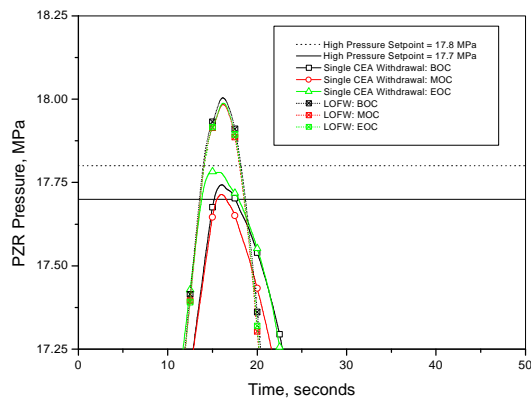


그림 5. 초기 사건에 따른 가압기 압력의 변화

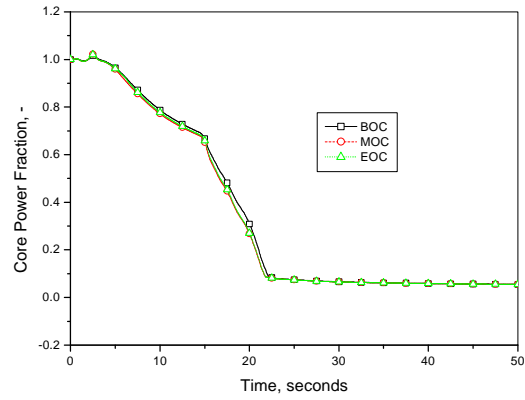


그림 6. 노심 출력의 변화 (초기 사건: LOFW)

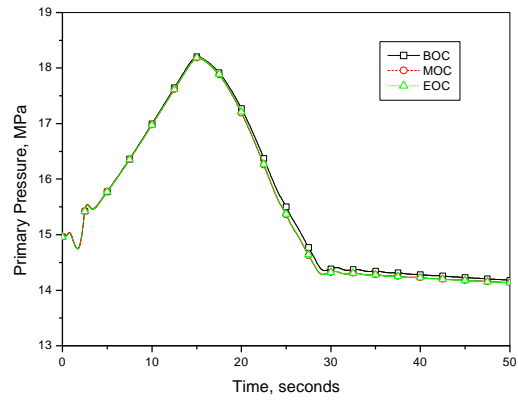


그림 7. 일차 계통의 압력 변화 (초기 사건: LOFW)

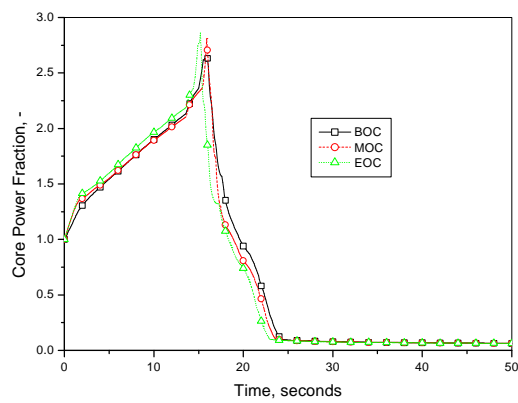


그림 8. 노심 출력의 변화 (초기 사건: 제어봉집합체군 인출 사건)

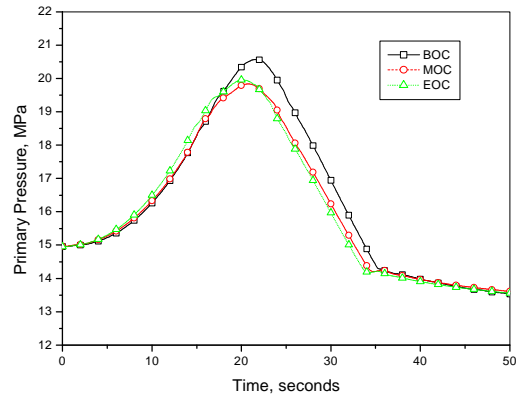


그림 9. 일차 계통의 압력 변화 (초기 사건: 제어봉집합체군 인출 사건)

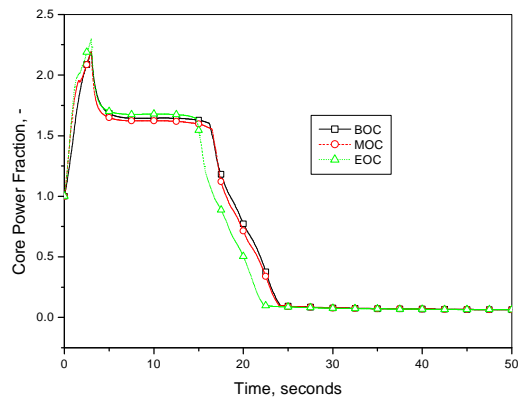


그림 10. 노심 출력의 변화 (초기 사건: 단일 제어봉집합체 인출 사건)

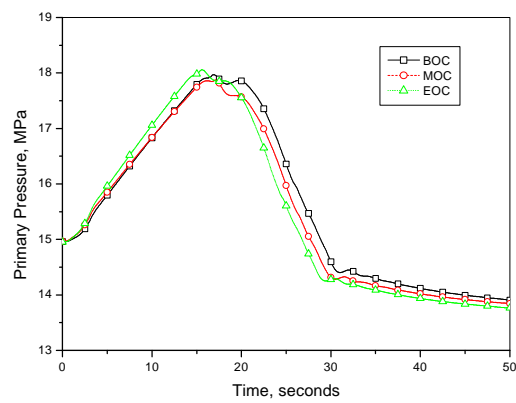


그림 11. 일차 계통의 압력 변화 (초기 사건: 단일 제어봉집합체 인출 사건)

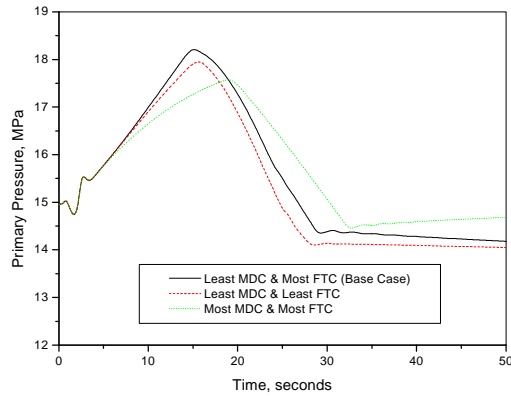


그림 12. 반응도에 따른 일차 계통의 압력 변화 (초기 사건: LOFW)

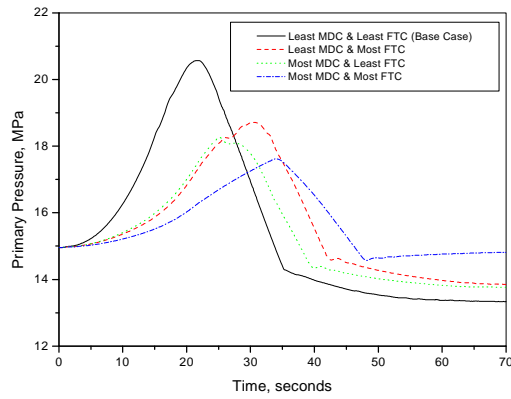


그림 13. 반응도에 따른 일차 계통의 압력 변화 (초기 사건: 제어봉집합체군 인출사건)

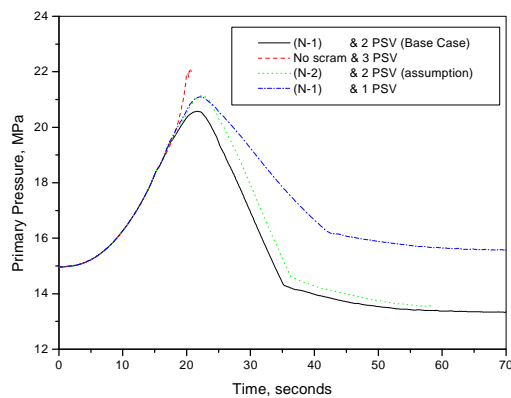


그림 14. 정지 제어봉가 및 가압기 안전 밸브에 따른 일차 계통의 압력 변화 (초기 사건: 제어봉집합체군 인출사건)