

SMART 과압보호계통 방출용량 평가
The Evaluation of the Relieving Capacity
for Overpressure Protection System of SMART

이 준, 강한옥, 유승엽, 윤주현

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

본 논문에서는 SMART 과압보호계통에 대한 방출용량을 평가하였다. 모의시 10 CFR 50.55a (c) (1), ASME Code, Sec. III, NB-7000, NUREG-0800 등 관련 요건을 적용하였으며, 모의 결과는 원자로냉각재계통에서 압력이 가장 높은 영역인 MCP 후단에서의 고압력이 관련 요건을 충족시키는 지 여부와 밸브 열림 시간 설정치에 따른 원자로냉각재계통의 압력 거동 측면에서의 타당성 여부에 대해 평가하였다. SMART 과압보호계통의 방출용량 분석 결과 주냉각재펌프 후단 영역의 첨두 압력은 약 18.2 MPa로 나타나 있는데 이는 계통 설계압력(17 MPa)의 107%에 해당되는 압력이며 설계요건(18.7 MPa) 대비 3%의 마진을 가지고 있는 것으로 평가되었다. 이외 vendor로부터 최근 제공된 POSRV 열림 시간(open dead/stroke time)에 대해서도 분석을 수행하였다. 분석 결과 가압기 중앙공동 및 주냉각재펌프 방출 영역의 첨두 압력에 대한 영향은 미미한 것으로 평가되었다.

Abstract

In this paper, the relieving capacity for overpressure protection system of SMART was analyzed. The related requirements of 10 CFR 50.55a (c) (1), ASME Code, Sec. III, NB-7000, NUREG-0800 were applied to the analysis. After the present analysis, it was evaluated that the RCS peaking pressure is about 18.2 MPa, 107% of system design pressure, and that it has 3% margin against the design requirement. Also, after the additional analysis, it was evaluated that the open dead/stroke time of POSRV has just a little effect on the peak pressure of PZR EC and MCP discharge.

약어

ADV Atmosphere Dump Valve (대기덤프밸브)
ASME American Society of Mechanical Engineers (미국기계학회)

APR-1400	Advanced Power Reactor 1400 ('고유명사')
Aux. FW	Auxiliary Feedwater (보조급수)
CFR	Code of Federal Regulations (미연방규제요건)
DBE	Design Basis Event (설계기준사고)
PZR EC	PZR End Cavity (가압기 중앙공동)
MCP	Main Coolant Pump (주냉각재펌프)
MSIV	Main Steam Isolation Valve (주증기격리밸브)
MSSV	Main Steam Safety Valve (주증기안전밸브)
POSRV	Pilot Operated Safety Relief Valve (과일릿구동안전방출밸브)
PRHRS	Passive Residual Heat Removal System (피동잔열제거계통)
RG	Regulatory Guide (미국원자력규제지침)
SMART	System-Integrated Modular Advanced Reactor('고유명사')

1. 서론

SMART는 일체형원자로로서 원자로냉각재계통은 제어봉구동장치 12개, 주냉각재펌프 2대, 증기발생기 카세트 12개, 가압기 등의 주요 기기 및 이들이 위치하고 있는 원자로 압력용기, 그리고 가스실린더 3대 등으로 구성되어 있으며 각각의 가스실린더의 상부에 POSRV가 설치되어 있다. Figure 1은 원자로냉각재계통 개략도를 보여준다. 그리고 원자로냉각재계통의 설계변수는 Table 1에 기술되어 있다.

가스실린더는 원자로냉각재계통내의 압력변동을 완충하는 기능을 한다. 가스실린더는 원통형 용기이며 총 3개로 구성되어 있다. 각각의 가스실린더의 상부헤드에 연결된 배관은 1개의 배관으로 합쳐져 가압기 상부와 연결되어 있다. 정상운전시 원자로의 급격한 출력 상승 및 감발 운전에 대비하기 위해 가스실린더 연결배관의 격리밸브를 열어놓는다. 가스실린더의 체적이 크기 때문에 급격한 출력 상승 및 감발로 인한 압력 과도상태시에도 원자로 정지 없이 운전을 계속할 수 있도록 설계되어 있다. 가압기 및 가스실린더의 설계변수는 Table 2와 같다. POSRV는 여러 제품이 있고 각각 장단점을 지니고 있지만 밸브가 열리는 시간이 상대적으로 빠른 밸브를 선정하여 현재 방출용량을 평가하는 등 과압보호계통을 설계중에 있다.

본 논문에서는 밸브가 열리는 시간이 상대적으로 빠른 밸브를 선정하여 먼저 밸브 용량에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 모의시 10 CFR 50.55a (c) (1), ASME Code, Sec. III, NB-7000, NUREG-0800 등 관련 요건을 적용하였으며, 모의 결과는 원자로냉각재계통에서 압력이 가장 높은 영역인 MCP 후단에서의 고압력이 관련 요건을 충족시키는 지 여부와 밸브 열림 시간 설정치에 따른 원자로냉각재계통의 압력 거동 측면에서의 타당성 여부에 대해 평가하였다.

본 성능평가는 SMART 제어 및 보호 논리 평가 목적으로 개발된 MMS 모델을 사용

하였다. MMS는 플랜트 천이운전 모사를 위한 상업용 컴퓨터 코드이며 플랜트의 주요기기를 나타내는 파이프, 펌프, 밸브, 터빈 발전기, 복수기 및 각종제어모듈 등등의 모듈 Library를 가지고 있다. 사용자는 Library로부터 이들 모듈을 꺼내와 Graphical User Interface(GUI)인 MMS Model Builder에서 기기를 조립해 plant를 설계하듯이 원하는 plant의 모델을 구성하고 필요한 입력자료 및 제어로직을 넣어, 발전소의 각종 천이운전을 모사할 수 있다. MMS코드 package의 이러한 특성 및 장점 때문에, 계통의 설계 및 성능해석, 제어계통의 설계 및 평가 기기사양결정, 기기선정 및 기기를 plant에 결합하는 설계의 전 과정에 유용하게 사용될 수 있다. SMART MMS 모델은 원자로냉각재계통, 이차계통, 잔열제거계통, 기기냉각계통을 포함하고 있다. 또한 실제적인 운전과정을 모사할 수 있는 제어계통 및 보호계통이 포함되어있다. Figure 2는 SMART MMS 모델을 보여준다.

2. 과압보호 관련 요건

o 10 CFR 50.55a Codes and standards

(c) Reactor coolant pressure boundary. (1) Components which are part of the reactor coolant pressure boundary must meet the requirements for Class 1 components in Section III of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code.

o ASME Code, Sec. III, NB-7000, Overpressure protection^[2]

- NB-7110, Scope

a) A system shall be protected from the consequences arising from the application of conditions of pressure and coincident temperature that would cause either the design pressure or the Service Limits specified in the Design Specification to be exceeded.

b) Pressure relief devices are required when the operating conditions considered in the Overpressure protection Report would cause the Service Limits specified in the Design Specification to be exceeded.

- NB-7120, Integrated overpressure protection

Overpressure protection of the components shall be provided by any of the following as an integrated overpressure protection;

a) the use of pressure relief devices and associated pressure sensing elements;

b) the use of the reactor shutdown system;

c) a design without pressure relief devices that does not exceed the Service Limits specified in the Design Specifications.

- NB-7311, Relieving capacity of pressure relief devices

- b) The total relieving capacity shall be sufficient to prevent a rise in pressure of more than 10% above the Design Pressure of any component within the pressure-retaining boundary of the protected system under any expected system pressure transient conditions as summarized in the Overpressure Protection Report.

3. 임계 질량유량 관계식 및 계통 초기조건

POSRV 개방시 적용된 임계 상태에서의 질량유량 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{m} = \sqrt{k} A \frac{P^*}{\sqrt{RT^*}}$$

여기서, k : specific heat ratio(= c_p/c_v)

A : valve flow area

P^* : critical pressure

R : gas constant

T^* : critical temp.

비열비는 1.4(for nitrogen, at 300 K)이고, 기체상수는 296.8 J/kg K(for nitrogen)이다. 임계압력 P^* 및 임계온도 T^* 는 각각 $P^* = P_0 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ 및 $T^* = T_0 \left(\frac{2}{k+1}\right)$ 식에 의해 구할 수 있다.

과압보호 해석시 계통 초기조건은 NUREG-0800, 5.2.2항에 따라 설정되었으며, 구체적으로 상용로에 적용하고 있는 초기조건 모델을 이용하였다. 그 내용은 다음과 같다.

- 부하상실사건의 시작시 원자로냉각재계통과 주증기계통은 최대 정격출력에 2%의 불확실성을 더한 출력준위에 있다고 가정한다.
- 감속재 온도계수는 0을 사용하였다.
- 도플러 계수는 least negative 값을 사용하였다.
- 부하상실사건 분석에서 터빈우회, 주급수, 보조급수는 작동되지 않는다.
- 본 분석은 계측 오차와 안전밸브 설정치의 불확실성을 고려하였다.
- 원자로트립은 원자로보호계통에서 두번째로 발생하는 안전등급 신호에 의해 일어난다.

상기 조건에 더하여 SMART 계통 특성 및 POSRV 특성을 고려하여 가정한 사건 초기 조건은 다음과 같다.

- SMART 이차측에 설치되어 있는 PRHRS는 작동되지 않으며, 또한 이차측에 MSSV 나 ADV가 설치되어 있지 않다(현재의 설계현황임.). 따라서 상용로와는 달리 일차측의 과압보호계통 방출용량 평가시는 MSSV 작동과 연계되어 방출용량이 결정되지 않

는다.

- POSRV 개방압력은 17.27 MPa 이다.
 - * 원자로냉각재계통 설계압력 : 17.00 MPa
 - * POSRV 개방오차 : +0.17 MPa(+1 %)(ASME Code)
 - * 기타 Uncertainty/margin : +0.1 MPa
- 원자로냉각재계통 고압력 원자로정지설정치 : 16.7 MPa
- 원자로 출력 : 정격 출력의 102 %

해석시 가정하여 사용된 계측 변수 및 보호계통 작동과 관련된 시간지연 값들은 다음과 같다.

<u>신호유형</u>	<u>지연시간(sec)</u>
노심 출력	0.5
증기발생기 입구 냉각재 온도	8.4
가압기 압력	0.975
주증기 격리밸브 후단 압력	1.2
주급수 유량	1.0
원자로 트립신호	0.5

또한 vendor로부터 제공된 POSRV 열림/닫힘 시간은 다음과 같다.

Open dead time/stroke time : 0.3/0.8 초 (total 1.1 초)

Close dead time/stroke time : 0.6/1.1 초 (total 1.7 초)

4. 방출용량 분석

SMART 과압보호계통의 방출용량 분석 결과는 Figure 3, 4, 5와 같다. Figure 3은 POSRV 유로 면적에 따른 가스실린더 및 가압기 중앙공동의 압력을 보여준다. 유로 면적 변화에 따른 POSRV 개방시의 압력의 최고치는 계통 특성상 거의 동일하며, POSRV 격리시의 압력의 추이는 용량 변화에 비례하여 변화한다. 유로 면적이 작은 경우는 충분히 감압되지 않고 압력이 재상승하는 결과를 볼 수 있으며, 반면 유로 면적이 설계 유로 면적보다 과도하게 클 경우는 포화압력에 접근하게 되어 계통내 비등이 발생될 것으로 쉽게 예상할 수 있다. 한편, POSRV 개방압력(17.27 MPa)은 가스실린더 압력을 변수로 받고 있기 때문에 POSRV 개방시의 중앙공동 압력은 가스실린더 압력보다 높은 약 17.7 MPa로 나타나고 있음을 알 수 있다.

Figure 4는 가압기 중앙공동 및 주냉각재펌프 후단 영역의 첨두 압력(for Base Case)을 보여준다. 주냉각재펌프 후단 영역의 첨두 압력은 약 18.2 MPa로 나타나 있는데 이는 계통 설계압력(17 MPa)의 107%에 해당되는 압력이며 설계요건(18.7 MPa) 대비 3%(0.5 MPa)의 마진을 가지고 있는 것으로 평가되었다.

Figure 5는 방출유량(for Base Case)을 보여준다. POSRV 개방압력에서의 방출유량은 약 20.2 kg/sec로 나타나 있다. POSRV 1회 개방시의 총 방출량은 가압기압력방출탱크 설계시 입력 값으로 이용된다.

이외 vendor로부터 최근 제공된 POSRV 열림 시간(Open dead time/stroke time : 0.2/0.3 초)에 대해서도 분석을 수행하였다. 분석 결과 가압기 중앙공동 및 주냉각재펌프 방출 영역의 침투 압력에 대한 영향은 미미한 것으로 평가되었다.

5. 결론

SMART의 경우 POSRV 개방압력(17.27 MPa)은 가스실린더 압력을 변수로 받고 있기 때문에 POSRV 개방시의 중앙공동 압력은 가스실린더 압력보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

SMART 과압보호계통의 방출용량 분석 결과 주냉각재펌프 후단 영역의 침투 압력은 약 18.2 MPa로 나타나 있는데 이는 계통 설계압력(17 MPa)의 107%에 해당되는 압력이며 설계요건(18.7 MPa) 대비 3%(0.5 MPa)의 마진을 가지고 있는 것으로 평가되었다.

이외 vendor로부터 최근 제공된 POSRV 열림 시간(Open dead time/stroke time : 0.2/0.3 초)에 대해서도 분석을 수행하였다. 분석 결과 가압기 중앙공동 및 주냉각재펌프 방출 영역의 침투 압력에 대한 영향은 미미한 것으로 평가되었다.

Table 1. RCS Design Parameter

설계 압력/온도, MPa/°C	17/350
운전 압력, MPa	14.7
증기발생기 일차측 입구(고온측) 온도, °C	310
증기발생기 일차측 출구(저온측) 온도, °C	274
원자로 냉각재 유량, kg/s	360
주냉각재펌프 대수, 대	2
증기발생기 카세트 개수, 개	12
계통 체적 (가압기 포함, 가스실린더 제외), m ³	14
가압기 체적, m ³	3.7
가스실린더 체적, m ³	2.4

Table 2. PZR / Gas Cylinder Design Parameter

설계 압력/온도, MPa/°C	17/350
운전 압력, MPa	≤15
중앙공동내 운전 온도, °C	≤100
가압기 물/가스 총체적, m ³	3.7
중앙공동 물/가스 체적, m ³	1.3
중간공동 물 체적, m ³	0.6
환형공동 물 체적, m ³	1.8
가스실린더 설계 압력/온도, MPa/°C	17/350
가스실린더 운전 압력, MPa	≤15
가스실린더 운전 온도, °C	≤50
가스실린더 개수, 개	3
가스실린더 총체적, m ³	2.4
가스실린더 작동 유체	질소

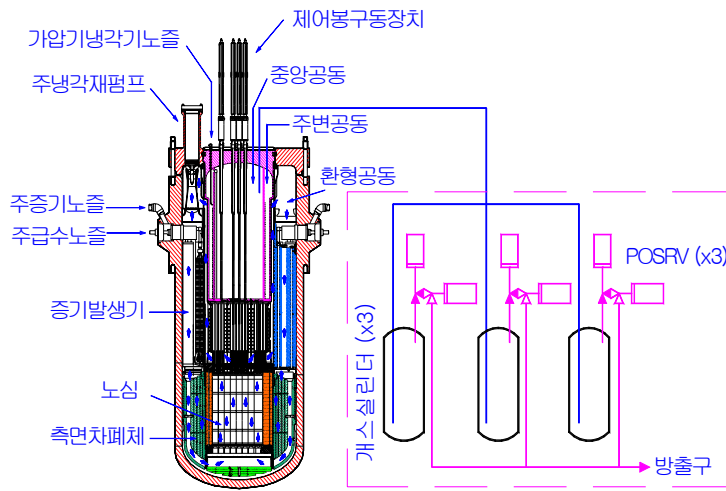


Figure 1. SMART RCS Schematic Diagram

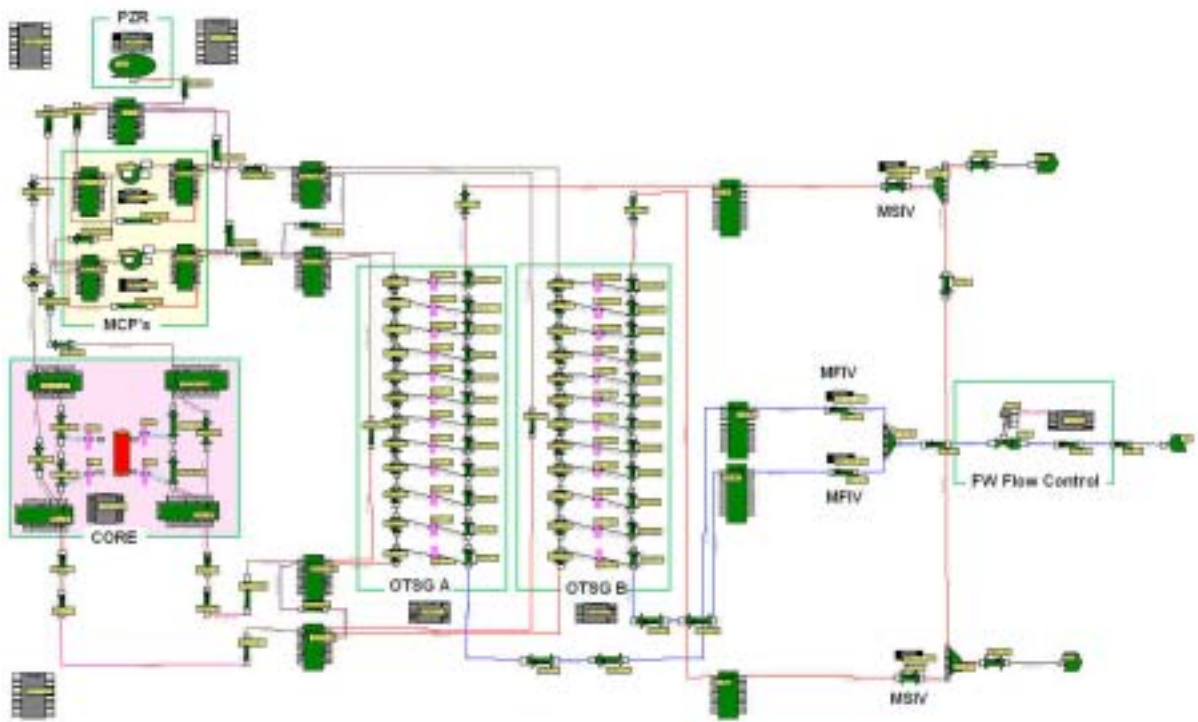


Figure 2. SMART MMS Model

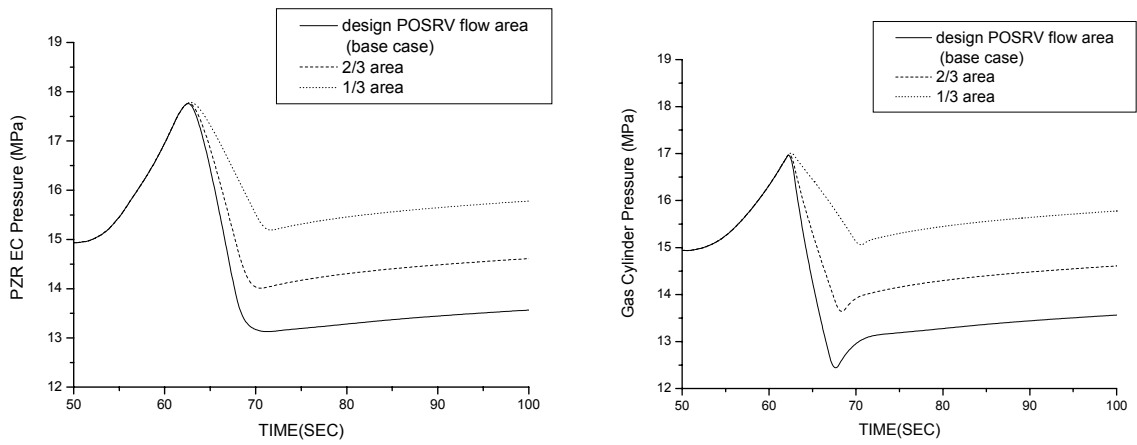


Figure 3. Gas Cylinder and PZR EC Pressure vs. POSRV Capacity

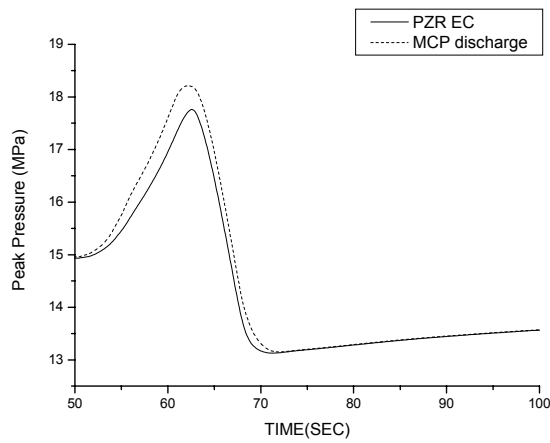


Figure 4. PZR EC and RCS Peaking Pressure (for Base Case)

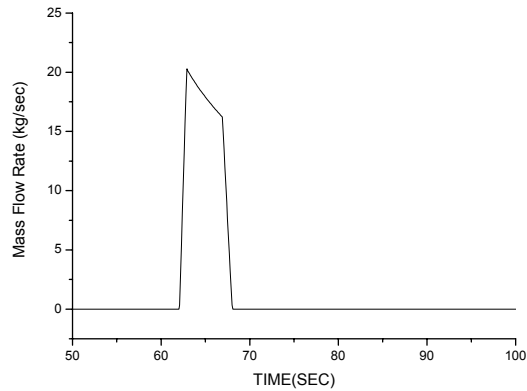


Figure 5. Relieving Flow Rate (for Base Case)

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력증장기개발 프로그램의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. "10 CFR", 50.55a(Code and Standards), 50.62(Requirements for reduction of risk from anticipated transient without scram(ATWS) events for light-water-cooled nuclear power plants), NRC
2. "ASME Code", Sec. III, NB-7000(Overpressure Protection), ASME
3. "NUREG", NUREG-0800, NRC
4. "UCN 3&4 FSAR", Chap. 5, KEPCO
5. "APR-1400 SSAR", Chap. 5, KEPCO
6. 강연문 외, "일체형원자로 가압기의 파단유량 해석을 위한 임계유동 모델 기술현황 분석보고서", KAERI/AR-525/99, KAERI, 1999.
7. 이준 외, "한국형 차세대원자로의 가압기 및 관련계통 설계특성 분석", KAERI/TR-627/95, KAERI, 1995.
8. 이준 외, "SMART 시스템의 설계를 위한 원자로 과압보호 시스템 기술현황 분석", KAERI/AR-618/2001, KAERI, 2001.
9. "MMS Basic Manual", FTI, 1998.