2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART-P 과압보호해석

SMART-P Overpressure Protection Analysis

강한옥, 이준, 최병선, 유승엽, 윤주현

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지 사서함 105

요 약

NUREG-0800에서 제시하고 있는 방법론에 근거하여 SMART-P MMS 모델을 이용해 부하상실사고를 초기사고로 하여 SMART-P 원자로냉각재계통에 대한 과압보호해석을 수행하였다. 과압보호해석을 위해 기존에 보호 및 제어논리 평가를 위해 개발된 SMART-P MMS 모델에 POSRV 방출 모델 및 RDT 모델을 추가하고 필요한 부분을 수정하였다. 부하상실사고에 대한 MMS 해석결과는 현재의 SMART-P 과압보호설비 설계 값이 사용될 경우 최대압력이 원자로용기 설계압력의 110%를 넘지 않으며 ASME 코드 요건을 만족시킴을 보여주었다. 가압기 내부 밀림관의 직경에 대한 민감도 계산은 밀림관의 직경이 감소할 경우 고온부의 냉각재가 가압기로 충분히 유입되지 못해 원자로 냉각재 최대 압력이 크게 증가하는 경향을 보여주었다. 반면에 가스실린더 연결배관에 설치된 오리피스 직경에 대한 민감도 계산은 오리피스 직경변화가 냉각재 최대 압력에 미치는 영향이 상대적으로 작다는 것을 보여주었다.

Abstract

Overpressure protection analysis on SMART-P was performed according to NUREG-0800. The loss of load event, in conjunction with a delayed reactor trip, is the design basis for evaluating the adequacy of the overpressure protection facility. POSRV discharge and reactor drain tank models were installed in SMART-P MMS model, which had been developed for the assessment of control and protection logics of plant. The result shows that RCS pressure remains below 110% of design pressure during the event. As diameters of surging lines between pressurizer cavities decrease, coolant flow into internal cavities is obstructed and the maximum pressures of RCS greatly increase above the limit value. Meanwhile, variation of orifice diameter of connecting line between gas cylinder and pressurizer does not show significant effect on maximum pressures of RCS.

1. 서 론

SMART-P는 소규모 전력 생산 및 해수 담수화 목적으로 개발 중인 SMART (System-Integrated Modular Advanced ReacTor)의 실험 원자로이다[1]. SMART-P는 기존의 분리형 상용로와는 달리 주냉각재펌프, 증기발생기, 가압기 등 일차계통 주요 기기들이 원자로용기 내에 설치되어 있다. 따라서 일차계통 내에 주냉각재펌프나 증기발생기를 연결하는 대형 유로배관이 없으므로 대형냉각재상실사고의 가능성이 근원적으로 배제되어 있는 원자로이다. 주냉각재펌프는 원자로용기내 상부 반경방향 바깥쪽 환형공간에 180도 간격으로 2대가 설치되어 있으며 원자로용기 환형덮개를 위로 관통하여 수직으로 설치되어 있다. 증기발생기는 원자로용기내 중앙 반경방향 바깥쪽 환형공간에 간격 없이 12대가 설치되어 있다. 가압기 또한 원자로용기내에 위치하는 내장형 형태로서 원자로용기내 상부에 위치하고 있으며 환형공동, 주변공동, 중앙공동으로 구성되어 있다. 가압기 환형공동과 주변공동, 그리고 주변공동과 중앙공동은 각각 밀림관으로 연결되어 있으며 가압기 중앙공동의 상부에는 외부로 1개의 배관이 설치되어 있고 이 배관은 가스실린더 3대와 연결되어 있다. 정상운전시 중앙공동 하부는 일차측 냉각재로 채워져 있으며 중앙공동 상부 및 가스실린더는 가스(질소)로 채워져 있다. 이외 이차측의 경우, 상용로와는 달리 안전감압계통의 작동과 연관있는 보조급수계통이 없는 대신 피동잔열제거계통이 설치되어 있다. 피동잔열제거계통은 이차측 증기 및 급수배관에 4 Train이 연결되어 있으며 정상 발전소 냉각 또는 설계기준사고시는 오직 2 Train으로 그 기능을 수행할 수 있도록 설계되어 있다.

원자로 압력용기는 10CFR 50.55a 및 ASME Boiler and Pressure Vessel Code에 기술되어 있는 과압보호 요건을 만족시키도록 요구된다[2,3]. 일부 상용로의 경우 과압보호 기능을 하는 PSV (Pressurizer Safety Valve) 이외에 별도로 급속 감압 기능을 하는 SDS (Safety Depressurization System)가 설치되어 있다. 한편 일부 다른 상용로의 경우는 과압보호 기능 이외에 추가하여 급속 감압 기능도 수행할 수 있는 POSRV (Pilot Operated Safety Relief Valve)가 설치되어 있다. 영광 3&4, 울진 3&4호기 등 CE형 상용로가 전자의 경우에 해당하며 울진 1&2호기 등 Framatome형 상용로 및 개발중인 APR-1400이 후자에 해당한다[4]. 기능 측면에서 PSV 및 POSRV는 과압보호 설비에 해당하며 상용로의 경우 DBE인 비안전등급설비의 작동제어가 불가한 상태에서의 부하상실(Loss of load) 사고(NUREG-0800)를 대상 Event로 하여 설계인자가 결정되고 운전은 자동으로 작동되는 설비이다[5].

일체형원자로의 일차계통 과압보호 개념은 기존 상용로의 과압보호 개념과 근본적으로 동일하다고 할 수 있다. 반면 일체형원자로는 기본개념 또는 구조적 특성 및 주변 설비와의 연동성 등이 상용로와는 다르기 때문에 상용로에서 설치되어 사용되고 있는 과압보호 설비의 수정 및 보완이 필요하다. 기존에 한국원자력연구소에서는 기존 사용원자로에서 사용되고 있는 과압보호설비의 장단점을 분석하여 다음과 같은 SMART-P 과압보호설비안을 제시하였다[4].

- 과압보호 기기 : POSRV
- 과압보호 기기 설치위치 : 가스실린더

SMART-P 과압보호설비에 대한 구성도를 그림 1에 나타내었다. 과압보호기능에 추가하여 POSRV는 급속감압 기능 및 ATWS 대비 계통으로서의 기능을 함께 수행하도록 설계된다. 한편, 향후 POSRV 설계와 관련하여 POSRV 유형 선정, 사이징, 전후단 배관 배치 요건 등에 대한 연

구가 필요하다.

본 연구에서는 NUREG-0800에서 제시하고 있는 방법론에 따라 부하상실시 원자로냉각재계통의 거동을 분석하였다. 기존에 SMART-P 제어 및 보호 논리 평가 목적으로 개발된 MMS 모델을 수정하고 POSRV 모델을 추가하여 부하상실사고를 해석하였다. 이 해석에서 원자로냉각재계통의 압력거동에 영향을 크게 미치는 가압기내 밀림관, 가압기 및 외부 가스실린더 연결배관에 대한 자세한 설계자료가 반영되었다. 수정된 MMS 모델을 이용하여 부하상실사고시 POSRV 직경 및 숫자, 연결 배관 직경의 변화 등이 원자로냉각재계통 첨두 출력에 미치는 영향을 평가하였다.

2. SMART-P 과압 보호 해석

본 연구에서는 과압보호해석을 기준 사고로서 NUREG-0800에서 서술된 바와 같이 지연된 원자로 트립을 포함하는 부하상실사고를 선택하였으며 기존에 SMART-P 제어 및 보호 논리 평가 목적으로 개발된 MMS 모델을 수정하여 해석을 수행하였다. MMS는 플랜트 천이운전 모사를 위한 상업용 컴퓨터 코드이며 플랜트의 주요기기를 나타내는 파이프, 펌프, 밸브, 터빈 발전기, 복수기 및 각종제어모듈 등등의 모듈 Library를 가지고 있다[6]. 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 모사 할 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. 기존에 개발된 SMART-P MMS 모델은 원자로냉각재계통, 이차계통, 잔열제거계통, 기기냉각계통을 포함하고 있다. 또한 실제적인 운전과정을 모사할 수 있는 제어계통 및 보호계통이 포함되어있다. SMART-P MMS 모델은 SMART-P의 전반적인 운전 특성 파악 및 제어계통 개발에 목적을 두고 개발되었으며 본 연구에서는 과압보호해석 목적으로 기존의 SMART-P MMS 모델을 수정하여 사용하였다. 그림 2는 수정된 SMART-P MMS 모델을 보여준다. 과압보호해석과 관련하여 이차계통 및 피동잔열제거계통의 신뢰성이 보장받지 못하므로 해석모델에서 제외되었으며 MMS 모델은 원자로 냉각재계통 및 급수/주증기계통의 일부분을 포함하고 있다. 그림에 여러 개의 코드 블록이 나타나있다. 국부적인 제어논리는 해당되는 기기 옆의 코드블럭에서 제공되는 반면 플랜트 전체적인 제어논리는 CBCTRL에서 제공된다. 현재 CBCTRL에는 전체적인 제어 및 보호신호 생성 및 이후 액션에 대한 논리가 서술되어있다. 원자로 출력제어 및 제어봉구동장치 제어계통은 코드블럭 CBCORE에 서술되어있다. 현재 MMS 모듈 라이브러리에서 가압기 안전 밸브 및 RDT에 해당되는 모듈은 존재하지 않는다. 따라서 가압기 안전 밸브 및 RDT를 해석하기 위한 코딩을 PZRDIS 코드블럭에 서술하여 해석을 수행하였다.

가스실린더 상단 노즐에 바로 설치되는 POSRV에서의 질량유속은 다음과 같은 식에 의해 계산된다[7].

$$\dot{m} = \sqrt{k}\, A \frac{P^*}{\sqrt{RT^*}} \tag{1}$$

위의 식에서 k, A, R은 각각 비열비, POSRV 유로면적, 기체상수를 의미하며 P^* 및 T^*는 임계압력 및 온도이다. P^* 및 T^*는 가스실린더 내부 조건으로부터 쉽게 구해진다. 위의 식은 임계유속

이 POSRV 후단에서 얻어진다고 가정할 경우 적용될 수 있으며 이러한 조건을 만족하기 위해서는 POSRV 후단의 배관의 직경이 충분히 크고 RDT의 압력이 충분히 낮은 상태로 유지되어 한다.

SMART-P에서 가압기는 원자로용기내 상부에 위치하고 있으며 환형공동, 주변공동, 중앙공동으로 구성되어 있다. 가압기 환형공동과 주변공동, 그리고 주변공동과 중앙공동은 각각 밀림관으로 연결되어 있으며 가압기 중앙공동의 상부에는 외부로 1개의 배관이 설치되어 있고 이 배관은 가스실린더 3대와 연결되어 있다. 과압보호해석을 위해서는 가압기 각 공동간의 밀림관과 외부 가스실린터로의 연결배관을 정확히 모사하는 것이 필요하다. 가압기 내부 각각의 밀림관에서의 K값은 다음과 같은 식에 의해 구해진다.

$$K = K_{in} + K_{loc} + K_{fric} + K_{out} \tag{2}$$

위의 식에서 오른쪽의 각 항은 입구저항, 굴곡 등에 의한 국부저항, 마찰저항, 출구 저항을 의미한다. 입구저항 및 출구 저항은 Idelchik의 방법론에 따라 구하였다[8]. 굴곡에 의한 국부저항과 마찰저항은 Crane 책으로부터 구하였다[9]. 가스실린더와의 연결배관도 비슷한 방식으로 구해지며 이 경우 원자로 용기 근처에 설치되는 오리피스를 반영하기 위한 추가적인 식이 필요하다. 본 연구에서는 오리피스가 연결배관 진입부에 설치된다고 가정하고 Idelchik의 방법론에 따라 필요한 K값을 구하였다. 한편 POSRV에서 방출되는 질소가스를 수용하는 RDT(Reactor Drain Tank)의 압력거동을 해석하기 위해 다음과 같이 단순한 형태의 상태방정식을 이용하였다.

$$PV = mRT \tag{3}$$

위의 식에서 왼쪽 항은 압력과 탱크 부피, 오른쪽 항은 탱크내 질소 질량, 기체상수, 온도를 의미한다. 탱크내 질소 질량은 POSRV의 작동에 의해 증가되며 중간 배관에서의 열손실은 무시하였다. 매 시간스텝당 탱크내 가스의 엔탈피는 다음과 같이 계산된다.

$$(m_n + \dot{m}_{POSRV} \cdot \Delta t) h_{n+1} = m_n \cdot h_n + \dot{m}_{POSRV} \cdot \Delta t \cdot h_{POSRV} \tag{4}$$

위의 식을 통해 얻어진 새로운 타임스텝에서의 엔탈피를 이용해 온도를 구할 수 있다. 엔탈피와 온도간의 관계식은 1979년 버전의 물성치 관계식을 이용하였다[10]. POSRV는 개방 및 격리신호가 발생한 후 실제로 작동되기 전에 어느 정도 시간지연을 가지고 있으며 밸브의 개방 및 격리가 선형적으로 이루어진다. 본 MMS 모델은 이러한 밸브의 개방/격리 특성을 반영하여 그림 3에서 나타낸 바와 같이 밸브를 모델링 하였다. 부하상실사고시 계통과압을 보수적으로 해석하기 위해 다음과 같은 가정이 도입되었다.

(1) 부하상실사고 초기에 원자로는 정격 출력에 2%의 불확실성을 더한 값으로 운전된다.
(2) 냉각재 반응도 계수는 0이고 도플러 반응도 계수는 least negative 값이 사용된다.
(3) 부하상실사고 발생시 비안전계통은 물론 안전계통인 피동잔열제거계통도 작동되지 않는다.
(4) POSRV는 상용원자로의 설계압력인 17.24 MPa에 불확실성을 고려하여 17.51 MPa에서 개방되는 것으로 가정되었으며 밸브 격리는 설계압력에 95% Blowdown Rate를 고려하여 16.37 MPa에서 이루어진다고 가정되었다.
(5) POSRV의 개방/격리 dead time은 0.3초이고 개방/격리 소요시간은 1.1초로 가정되었다.
(6) 원자로 트립신호는 원자로 보호계통의 두 번째 안전등급 신호에 의해 발생한다고 가정된다. 따라서 부하상실사고시 거의 동시에 이차측 변수에 의해 발생되는 주증기 고압신호 및 주급

수 저유량 신호는 무시되고 일차측 가압기 고압력 신호에 의해 원자로 트립이 발생한다고 가정된다.

(7) 세 개의 POSRV가 동시에 작동한다고 가정된다.

과압보호해석시 계측 변수 및 보호계통 작동과 관련된 시간지연은 해석결과에 크게 영향을 미친다. 본 연구에서 사용된 값들은 다음과 같다.

신호 유형	지연 시간(sec)
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

SMART-P 과압보호해석과 관련하여 사용된 주요 입력자료를 표 1에 나타내었다. 해석 초기에 급수 유량 및 원자로 출력은 앞에서 설명한 바와 같이 102 %로 운전된다. 이 때 가압기 압력 및 증기발생기 입구에서의 냉각재 온도는 거의 100 % 운전 값을 가지고 있다. 이 때 주증기 격리밸브에 대한 격리신호를 발생시킴으로써 부하상실사고를 모사하였다.

3. 결 과

앞장에서 서술된 가정 및 입력자료를 이용하여 부하상실사고에 대한 해석을 수행하였으며 그 결과를 그림 4~7에 나타내었다. 본 연구에서는 주증기 격리밸브에 대한 격리신호를 발생시킴으로써 부하상실사고를 모사하였다. 오동작 신호에 의한 주증기 격리밸브 격리 사고는 부하상실사고와 동시에 주증기 압력 제어계통이 고장나는 사고를 보수적으로 모사할 수 있다. 그림 4는 주증기 격리밸브의 격리 이후 급수 유량과 원자로 출력을 보여준다. 100초에서 주증기 격리밸브가 닫히기 시작하면 급수유량은 급속히 감소되기 시작한다. 몇 초 후 주증기 고압 신호 및 급수 저유량 신호에 의한 원자로 트립 신호가 발생하지만 본 계산에서는 이 신호들이 무시되었다. 이후 약 112초 근처에서 가압기 고압력 신호에 의해 원자로 트립 신호가 발생하여 출력이 급격히 감소하기 시작한다. 그림에서 원자로 출력이 원자로 트립 신호가 발생하기 전에 약간 감소하는 경향을 보여준다. 이러한 결과는 음의 냉각재 반응도 계수를 무시하였기 때문이며 실제적인 경우에는 트립 이전에도 원자로 출력은 급격히 감소하는 경향을 보여준다. 그림 5는 가압기 밀림관, 가스실린더 연결배관, POSRV에서의 유량을 보여주고 있다. 이차측에 의한 열제거가 중단되고 피동잔열제거계통이 연결되지 않을 경우 냉각재 밀도는 온도증가에 의해 급격히 감소하고 단위질량당 부피가 급격히 증가한다. 이에 따라 가압기 밀림관에서 가압기 쪽으로 많은 양의 유동이 발생한다. 이러한 유동은 원자로 트립 이후 감소하기 시작하다가 POSRV 개방 이후 다시 증가한 뒤 감소한다. 그림 5

에서 가압기 밀림관과 가스실린더 연결배관 사이에 유량 차이가 큰 것은 가압기 밀림관에는 냉각재가 흐르는 반면 가스 실린더 연결배관에는 질소가스가 흐르기 때문이다. 그림 6은 주증기 격리밸브 격리 이후의 시나리오를 냉각재 펌프 후단 압력과 연계하여 보여준다. 냉각재 펌프 후단 압력은 주증기 격리밸브 격리 이후 급격히 증가하다가 POSRV 개방 이후 감소하고 이후에 POSRV 격리된 뒤 다시 천천히 증가하기 시작한다. 과압보호설비는 설계기준사고가 발생하였을 때 최대 압력이 설계압력의 110%가 넘지 않도록 설계되어야한다. 그림 6에서 냉각재 펌프 후단 압력에서의 최대 압력은 최대 압력이 설계압력의 110%보다 약 1 MPa 정도 적음을 알 수 있다. 이러한 결과는 현재의 과압보호설비가 적절히 설계되었음을 보여준다. 그림 7은 가압기, 가스실린더, 냉각재 펌프 후단, RDT에서의 압력 거동을 보여준다. 주증기 격리밸브 격리 이후 가압기, 가스실린더, 냉각재 펌프 후단에서의 압력은 급격히 증가하기 시작하다가 원자로 트립 및 POSRV 개방 이후 감소한다. 한편 각각의 압력 거동간의 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 현재의 가시실린더와 가압기간 연결배관, 그리고 가압기 내 밀림관에서의 유동저항이 적절히 설계되었음을 보여준다. 그림 7은 또한 RDT에서의 압력 변화 경향을 보여준다. RDT는 초기에 상압으로 운전되던 중 POSRV로부터의 질소가스 방출에 의해 1 MPa로 가압된다.

앞의 해석결과는 가스실린더 상단에 설치된 POSRV 3개가 동시에 개방된다고 가정했을 때 얻어진 결과이다. 그림 8과 그림 9는 POSRV가 각각 1개, 2개, 3개 개방되었을 경우의 결과를 보여준다. 그림 8에서 주증기 격리밸브 격리이후 최대압력은 개방된 POSRV 숫자에 의존하지 않음을 알 수 있다. 개방된 POSRV 숫자는 오직 최대 압력이 발생한 뒤 이후의 압력 거동에 영향을 미친다. 개방된 POSRV 숫자가 증가할수록 POSRV 개방이후 최소 압력이 감소한다. 그림 9는 개방된 POSRV 숫자에 따른 POSRV 방출 유량 및 총 방출량을 보여준다. 개방된 POSRV 숫자가 증가함에 따라 최대 방출유량 및 총 방출량은 증가한다. POSRV 3개가 개방되었을 경우 1개가 개방되었을 경우에 비해 방출량은 2개 가까이 증가한다.

가압기 밀림관의 직경이 해석결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 UAC-IC 사이 밀림관과 IC-EC 사이 밀림관의 직경을 동시에 변경하면서 해석을 수행하였다. 배관의 수는 변경하지 않았으며 직경은 설계값의 40%에서 120% 사이에서 변경하였다. 이 해석의 결과를 그림 10~12에 나타내었다. 그림 10은 밀림관 직경 변화에 따른 가압기와 고온부 사이의 유량 거동을 보여준다. 밀림관에서의 유량의 크기는 주증기 격리밸브가 격리된 뒤 증가되며 원자로 트립 신호 이후 감소하기 시작하다고 POSRV가 개방되면 다시 증가한다. 이후에 POSRV가 격리된 뒤 다시 감소한다. 그림 10은 밀림관의 직경이 감소할수록 유동저항의 증가에 의해 유량의 크기가 감소함을 보여준다. 그림 11은 POSRV에서 방출유량을 보여준다. 밀림관의 직경이 감소할수록 POSRV 개방 시점이 늦추어지는 반면 방출 유량 자체의 변화는 거의 없다. 냉각재 펌프 후단 압력의 거동을 보여주는 그림 12에서 현재의 밀림관 직경을 더 이상 감소시킬 수 없음을 알 수 있다. 밀림관 직경을 증가시켜도 최대 압력의 값은 거의 변화가 없는 반면 밀림관 직경을 감소시킬 경우 최대 압력은 설계압력의 110% 이상으로 크게 증가한다.

마지막으로 가스실린더와 가압기 사이의 연결배관의 유동저항이 해석결과에 미치는 영향을 평가하기위해 연결배관 입구에 설치된 오리피스의 직경을 변경하면서 계산을 수행하였으며 그 결과를 그림 13~15에 나타내었다. 배관의 다른 설계변수는 변화시키지 않고 오리피스의 직경을 설계값의 40%에서 120% 사이에서 변경하면서 계산을 수행하였다. 그림 13은 오리피스의 직경 변화에

따른 가스실린더와 가압기 사이의 유량 거동을 보여준다. 밀림관에서의 유량의 크기는 주증기 격리밸브가 격리된 뒤 증가되며 오리피스의 직경에 관계없이 약 65초 근처에서 감소하기 시작한다. 이러한 거동은 가압기 밀림관 직경 변화에 대한 해석결과와 크게 다르다. 그림 14는 POSRV에서 방출유량을 보여주며 그림 15는 이 때 주냉각재 펌프 후단에서의 압력 거동을 보여준다. 오리피스 직경감소시 최대 압력치의 증가량은 가압기 밀림관 직경 변하에 대한 결과에 비해 상대적으로 작다. 이러한 결과는 LOCA시 냉각재 방출유량 감소를 위해 오리피스의 직경을 감소시킬 필요성이 있을 경우 다른 추가적인 사항을 고려한 뒤 오리피스 직경 설계치를 감소시킬 수 있음을 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 NUREG-0800에서 제시하고 있는 방법론에 근거하여 부하상실사고를 초기사고로 하여 SMART-P 원자로냉각재계통에 대한 과압보호해석을 수행하였다. 이를 위해 기존에 보호 및 제어논리 개발을 위해 개발된 SMART-P MMS 모델에 POSRV 방출 모델 및 RDT 모델을 추가하고 필요한 부분을 수정하였다. 이 해석에서 원자로냉각재계통 최대 압력에 크게 영향을 미치는 가압기내부 밀림관과 가스실린더 연결배관에 대한 상세한 설계자료가 사용되었으며 피동잔열제거계통은 작동되지 않는다고 가정되었다.

부하상실사고에 대한 MMS 해석결과는 현재의 SMART-P 과압보호설비 설계값이 사용될 경우 최대압력이 원자로용기 설계압력의 110%를 넘지 않으며 ASME 코드 요건을 만족시킴을 보여주었다. 또한 가압기, 가스실린더, 원자로냉각재펌프 후단 압력간의 차이가 크지 않았으며 이는 가압기내부 밀림관과 가스실린더 연결배관의 직경 및 길이에 대한 설계값이 적절하다는 것을 보여주었다. 가압기 압력이 설정치에 도달했을 때 개방되는 POSRV의 숫자가 감소하더라도 원자로 냉각재 펌프 후단 압력의 최대값은 변하지 않으며 그 이후의 압력거동에만 영향을 미친다. 가압기 내부 밀림관의 직경에 대한 민감도 계산은 밀림관의 직경이 감소할 경우 고온부의 냉각재가 가압기로 충분히 유입되지 못해 원자로 냉각재 최대 압력이 크게 증가하는 경향을 보여주었다. 반면에 가스실린더 연결배관에 설치된 오리피스 직경에 대한 민감도 계산은 오리피스 직경변화가 냉각재 최대 압력에 미치는 영향이 상대적으로 작다는 것을 보여주었다. 결론적으로 본 연구에서 수행된 SMART-P MMS 모델을 이용한 부하상실사고에 대한 과압보호해석은 현재의 SMART-P 과압보호설비가 ASME 코드 요건을 만족시킴을 보여주었으며 개발된 방법론은 이후 설계변경이 요구될 경우 과압보호설비의 적절성을 평가하기 위한 목적으로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 장문희, 일체형원자로 기본설계보고서, KAERI/TR-2142/2002, 한국원자력연구소, 2002.
2. “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.
3. “ASME Code”, Sec. III, NB-7000(Overpressure Protection), ASME.
4. 이준, SMART 시스템의 설계를 위한 원자로 과압보호 시스템 기술현황 보고서, KAERI/AR-618/2001, 한국원자력연구소, 2001.
5. “NUREG”, NUREG-0800, NRC.
6. MMS Basic Manual, Framatone Technologies, Inc., 1998.
7. 노희천, 핵기계공학, 한국원자력학회, 1989.
8. I. E. Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance, Hemisphere Publishing Corp., 1986.
9. Flow of Fluids through Valves, Fittings, and Pipe, Crane Co., 1988.
10. W. C. Reynolds, Thermodynamic Properties in SI, Stanford Univ. 1979.

표 1. SMART-P 과압보호해석을 위한 주요 입력자료

기기	변수	값
가압기	환형공동 부피	1.77 m^3
	UAC-IC 연결배관 길이	2
	UAC-IC 연결배관 직경	35 mm
	UAC-IC 연결배관 개수	6
	주변공동 부피	0.581992 m^3
	IC-EC 배관 길이	2 m
	IC-EC 배관 직경	50 mm
	IC-EC 배관 개수	2
	중앙공동 부피	1.3489
	중앙공동 수위	56 %
가스 실린더	가스실리더 개수	3
	가스실린더 부피(전체)	2.4 m^3
	가스실린더 연결배관 길이	10 + 10
	가스실린더 연결배관 직경	42.8 mm + 20.7 mm
	가스실린더 연결배관 격리밸브	1″ 게이트 밸브
	가스실린더 연결배관 오리피스	내경 1″
POSRV	개수	3
	내부 직경	20.7 mm
RDT	체적	10 m^3

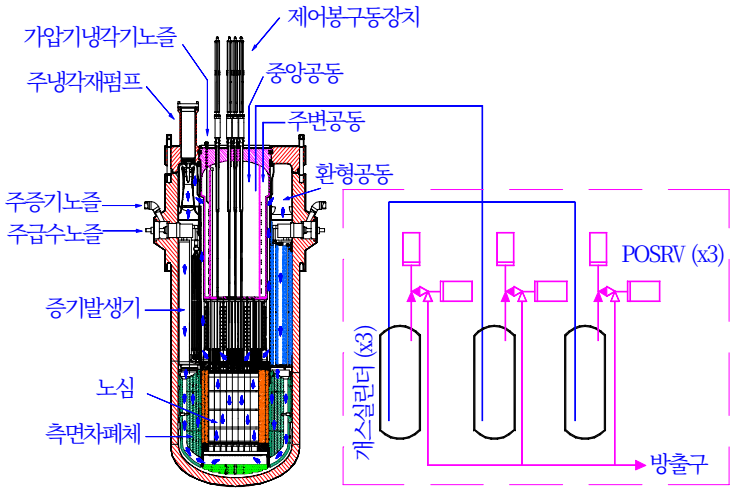


그림 1. SMART 일차계통 계통도 / 과압보호 시스템 구성도

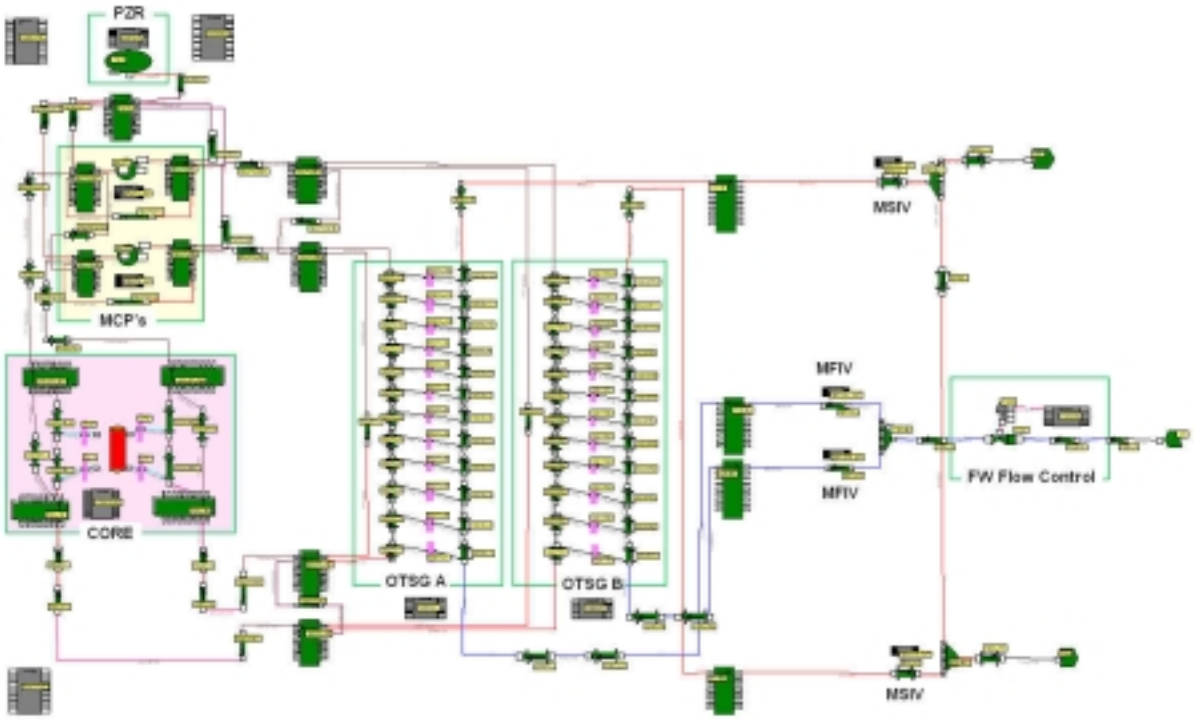
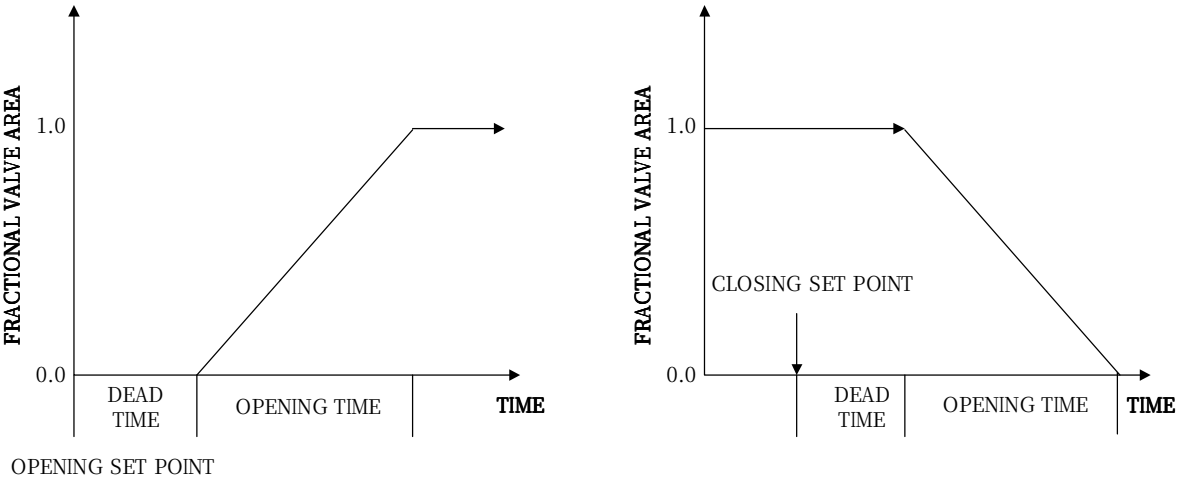


그림 2. SMART-P 과압보호해석을 위한 MMS 모델



(A) OPENING CHARACTERISTIC **(A) CLOSING CHARACTERISTIC**

그림 3. POSRV 개방 및 격리 특성

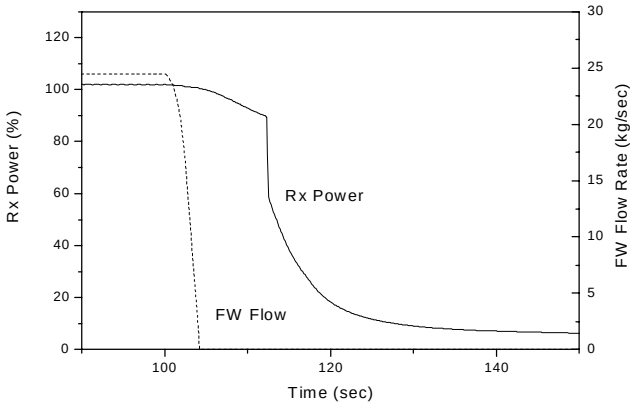


그림 4 급수 유량 및 원자로 출력

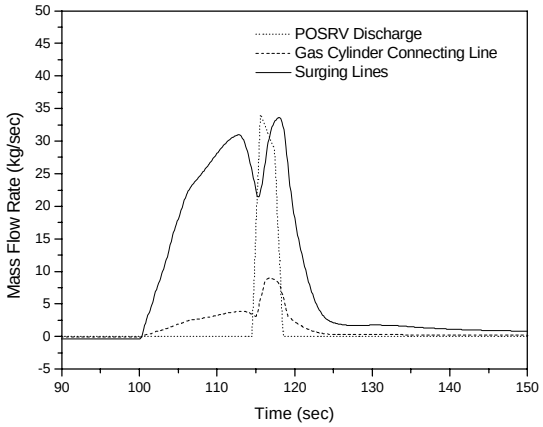


그림 5 가압기 밀림관, 가스실린더 연결배관, POSRV 유량

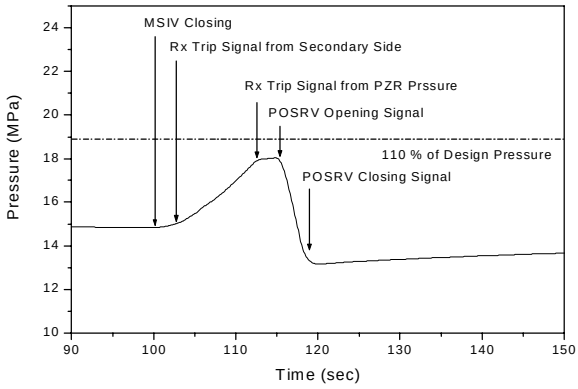


그림 6 주냉각재펌프 후단 압력

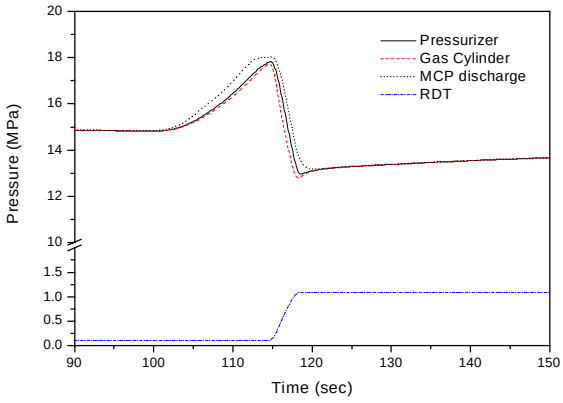


그림 7 가압기, 가스실린더, MCP 후단, RDT 압력

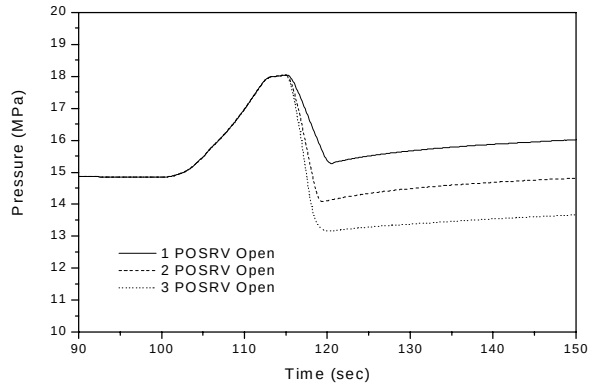


그림 8 개방된 POSRV 숫자에 따른 MCP 후단 압력 변화

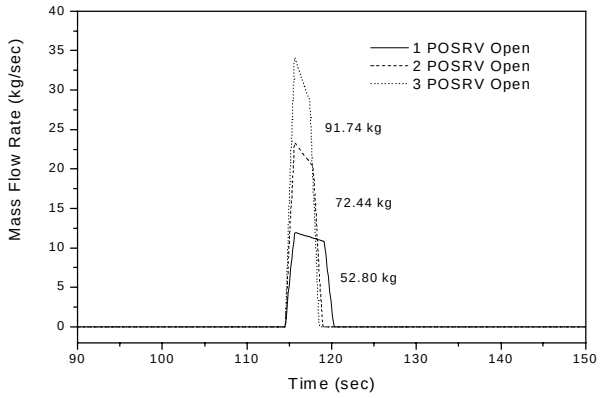


그림 9 방된 POSRV 숫자에 따른 방출유량 변화

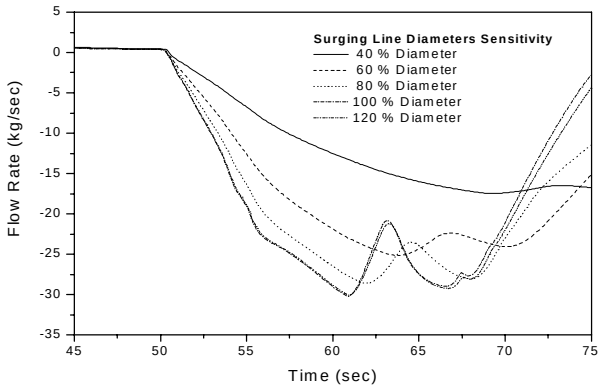


그림 10 밀림관 직경변화에 따른 가압기 유입 유량 변화

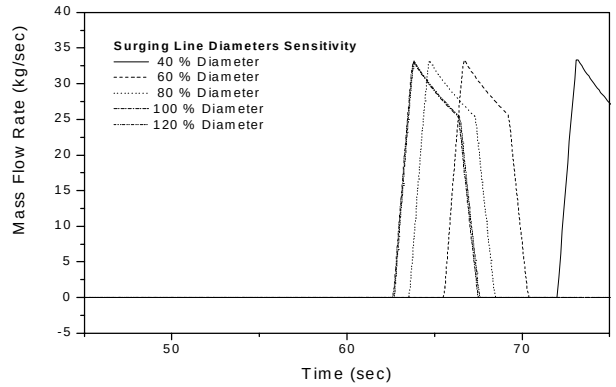


그림 11 밀림관 직경변화에 따른 POSRV 방출 유량 변화

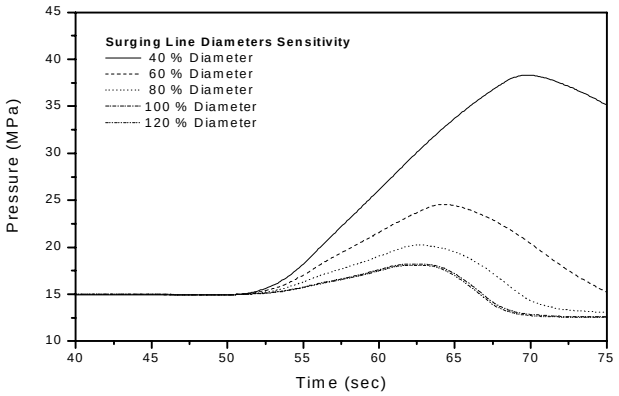


그림 12 밀림관 직경변화에 따른 MCP 후단 압력 변화

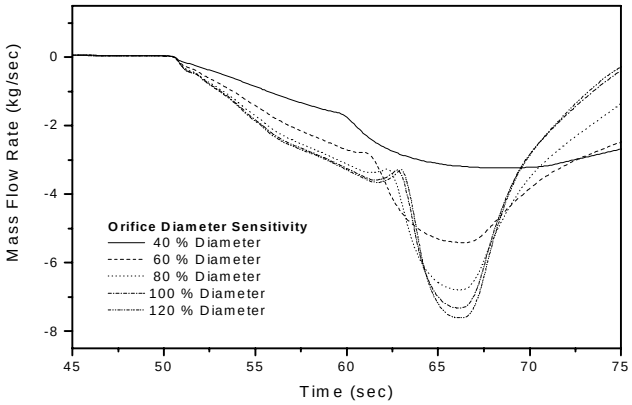


그림 13 오리피스 변화에 따른 가스실린더 유입 유량 변화

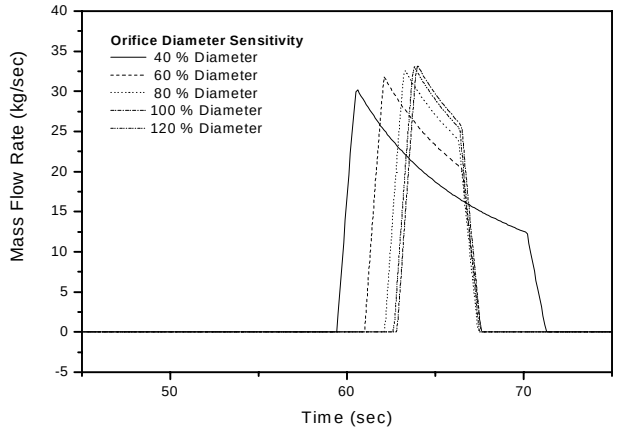


그림 14 오리피스 변화에 따른 POSRV 방출유량 변화

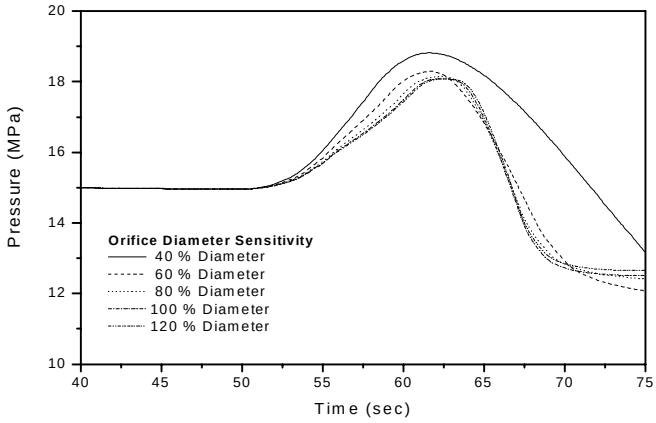


그림 15 오리피스 변화에 따른 MCP 후단 압력 변화