

SMART 가압기 중앙공동 성능 평가 The Performance Evaluation for PZR End Cavity of SMART

이 준, 강한욱, 서재광, 윤주현

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

본 논문에서는 피동 저온가압기, 피동잔열제거계통이 설치되어 있으며, 급수유량에 따라 원자로출력이 변하는 운전 특성을 지니고 있는 SMART 원자로에 대해 가압기 중앙공동에 대한 성능평가를 수행하였다. 중앙공동의 냉각재체적 분석 결과 총괄적으로 이차측을 이용한 원자로냉각재의 냉각율이 다소 큰 것으로 평가되었다. 발전소 운전자에 대한 조치 허용시간 내에 발전소 냉각 운전이 정상적으로 유지될 수 있도록, 원자로 정지시 냉각율의 영향 인자를 제어할 필요성이 있는 것으로 판단된다. 또한 중앙공동 기체체적 분석 결과 관련 설계요건을 충분히 충족시키고 있는 것으로 평가되었다. 특히 정상 수위가 80%일 경우도 중앙공동 최상부에 냉각재가 도달하지 않는 것으로 분석되었으며, 첨두 고압력 수치의 경우 상용로에 비해 단지 약 50% 정도(0.6 MPa) 만이 상승하는 것으로 분석되었다.

Abstract

In this paper, the performance for PZR end cavity of SMART has been evaluated in which the passive cold PZR and PRHRS had been installed and the FW control system that reactor power is controlled by FW flow rate had been adopted. After the present analysis of the coolant volume of end cavity, it was evaluated that the cooldown rate of reactor coolant is a little high if the secondary system is operated. Therefore the factors of having an effect on cooldown rate is to be automatically controlled in order to the cooldown operation of plant is normally maintained within the operator response time. Also after the analysis of the gas volume, it was evaluated that the results is much satisfied. Especially, it was analyzed that the peak pressure of end cavity is raised only about 50%(0.6 MPa) as contrasted with the commercial plants.

약 어

AC	Annular Cavity (환형공동)
ADV	Atmosphere Dump Valve (대기덤프밸브)
EC	End Cavity (중앙공동)
FW	Feedwater (급수)
IC	Intermediate Cavity (중간공동)
LOCV	Loss of Condenser Vacuum (응축기진공상실)
MCP	Main Coolant Pump (주냉각재펌프)
MSIV	Main Steam Isolation Valve (주증기격리밸브)
MSSV	Main Steam Safety Valve (주증기안전밸브)
PLCS	Pressurizer Level Control System (가압기수위제어계통)
POSRV	Pilot Operated Safety Relief Valve (파일럿구동 안전방출밸브)
PPCS	Pressurizer Pressure Control System (가압기압력제어계통)
PRHRS	Passive Residual Heat Removal System (피동잔열제거계통)
PZR	Pressurizer (가압기)
RX	Reactor (원자로)
SMART	System-Integrated Modular Advanced Reactor(‘고유명사’)
TBN	Turbine (터빈)
UAC	Upper Annular Cavity (환형공동)

기호 설명

	<u>Base variables</u>		<u>Subscripts</u>
w	Sum of rate of all mass flows	G	gas
P	pressure	V	vapor
h	specific enthalpy (averaged for flows for multiple streams)	L	liquid
		total	total
T	temperature	T	tank
Cp	specific heat	in	property of flow into region
M	mass	out	property of flow out of region
V	volume		
ρ	density		
ZMW	molecular weight of gas		

1. 서론

SMART는 일체형원자로로서 원자로냉각재계통은 제어봉구동장치 12개, 주냉각재펌프 2대, 증기발생기 카세트 12개, 가압기 등의 주요 기기 및 이들이 위치하고 있는 원자로 압력용기, 그리고 가스실린더 등으로 구성되어 있다. Figure 1은 원자로냉각재계통 개략도를 보여준다. 원자로냉각재계통 냉각재 유로는 노심, 주냉각재펌프, 증기발생기, 노심

순으로 형성된다.

원자로 압력용기 상부헤드에 장착된 2대의 주냉각재펌프에 의해 원자로용기 중앙하부에 위치하는 노심과, 노심지지배럴과 원자로용기 내벽사이의 환형공간에 위치하는 증기발생기 사이에 원자로냉각재 냉각재의 강제순환유동이 형성되어 노심에서 발생된 열이 증기발생기 전열관내의 이차 측으로 전달된다. 원자로냉각재계통은 증기발생기 전열관 바깥쪽으로 원자로냉각재가 흐르고 전열관 안쪽으로 이차 측 급수가 흘러 열전달이 이루어진다. 전열관내의 급수는 원자로냉각재로부터의 열전달에 의해 가열되면서 과냉각유동에서 이상유동으로, 이상유동에서 과열증기유동으로 상 전환된 후 증기발생기 헤드를 통해 터빈으로 방출된다. 원자로냉각재계통의 설계변수는 Table 1에 기술되어 있다.

상용로와는 달리 SMART의 출력운전 모드에는 주냉각재펌프의 회전속도와 관련하여 고속운전 및 저속운전이 있다. 후장에서 모의되는 원자로정지시의 경우 주냉각재펌프의 회전속도는 고속운전에서 저속운전으로 변환되도록 되어 있다.

또한 상용로와는 달리 SMART의 원자로냉각재계통 제어계통은 크게 출력제어 및 노심출구온도제어의 2가지로 구성된다. 출력범위 (5 % - 100 %)에서 요구출력수준에 맞는 열을 노심에서 생성하고 이를 증기발생기를 통해 제거하도록 하기 위해 출력-노심출구온도 제어프로그램 (온도제어) 과 급수유량-출력제어 프로그램 (출력제어) 이 사용된다. 출력제어에서는 노심출력이 급수유량 제어계통으로부터 오는 요구출력과 같아지도록 제어봉구동장치를 제어한다. 노심출구온도제어에서는 노심출구온도가 출력 및 주냉각재펌프 속도에 따라 프로그램된 노심출구온도와 같아지도록 제어봉구동장치를 제어한다. Figure 2는 급수유량-출력제어 프로그램을 보여준다. 후장에서 모의되는 원자로정지시의 경우 급수유량은 100%에서 5%까지 초당 10%씩 변환하도록 되어 있다.

SMART 가압기는 상용로와는 달리 원자로용기내 상부에 위치하며, 상용로에 비해 원자로냉각재 총체적 대비 가압기 용량이 상대적으로 크다. 가압기 구조는 전체 구역이 환형공동, 중간공동, 중앙공동 등 3개의 구역으로 나누어져 있는데 환형공동의 윗부분에서 중간공동의 밑부분으로, 중간공동의 윗부분에서 중앙공동의 밑부분으로 각각 원자로냉각재가 통하도록 연결되어 있다. 가압기 중앙공동은 원자로냉각재와 질소로 채워져 있다. 가압기 중앙공동 상부는 배관을 통해 가스실린더와 연결되어 있다. Figure 3은 가압기 형상을 보여준다. Figure 3에서 보는 바와 같이 가압기에는 가열기나 살수기능이 없으며, 가압기 압력은 출력운전중에는 증기 및 질소가스의 분압에 의해 자기(Self) 압력제어방식으로 제어되며, 기동, 정지운전중에는 고압질소계통(High-pressure Nitrogen System)을 이용하여 제어된다. 분압에 의한 압력 변동을 작게 하기 위해 가압기 중앙공동은 저온으로 유지되어 있다. 또한 가압기 수위는 기동, 정지, 출력운전중에는 제어되지 않으므로 이 운전중에는 별도의 냉각재 충전 및 유출은 없다.

가압기는 원자로 압력용기내 위치하고 있기 때문에 어떠한 제어수단이 없을 경우 가압기내 냉각재 온도가 노심출구온도와 같게 되고 따라서 가압기내의 압력변동이 원자로냉각재계통 온도 변화에 매우 민감하게 될 수 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 가압기 중앙공동내 냉각재가 저온으로 유지되도록 중간공동내에 가압기 냉각기 전열관을 설치하고

중간공동의 바깥면에는 습식단열재를 설치함으로써 저온가압기의 형태로 설계되어 있다. 저온가압기는 과도상태시 원자로냉각재계통의 압력변동을 보다 최소화할 수 있으며, 한편 압력변동이 작으므로 가압기 크기를 상대적으로 보다 작게 설계할 수 있는 장점도 지니고 있다. 출력운전시 가압기 수위는 중앙공동에 있으며, 압력은 15 MPa이하, 온도는 100 °C 이하인 저온상태로 유지되어 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.

본 논문에서는 상기와 같이 원자로정지시의 경우 주냉각재펌프의 회전속도의 고속운전에서 저속운전으로 변환, 급수유량의 100%에서 5%까지 초당 10%씩 변환 등의 운전 특성을 지니고 있는 원자로, 상용로와는 전혀 다른 구조 및 설계특성을 지니고 있는 피동 저온가압기, 그리고 주증기배관 차단시 이차측에 피동잔열제거계통이 작동하는 원자로에 대해, 가압기 중앙공동에 대한 성능평가를 하고자 한다.

본 성능평가는 SMART 제어 및 보호 논리 평가 목적으로 개발된 MMS 모델을 사용하였다. 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 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. SMART MMS 모델은 원자로냉각재계통, 이차계통, 잔열제거계통, 기기냉각계통을 포함하고 있다. 또한 실제적인 운전과정을 모사할 수 있는 제어계통 및 보호계통이 포함되어있다. Figure 4는 SMART MMS 모델을 보여준다.

2. 가압기 모델

가. 개요

SMART 가압기는 UAC, IC, EC, 가압기냉각기, 가스실린더, 가스실린더 격리밸브 등으로 구성되어 있다. 원자로가 가열될 때 가압기 수위는 UAC에서 IC를 통해 EC로 이동한다. 정상 출력운전 모드 동안에 UAC 및 IC는 냉각재로 채워지고 EC는 냉각재와 질소가스로 채워진다. 모든 종류의 원자로 운전 모드 동안 일어나는 물리적 현상을 표현하기 위해 도입된 관련 지배방정식은 다음과 같다.

- Mass conservation equation for the liquid region
- Energy conservation equation for each water volume in UAC, IC and EC
- Mass and energy conservation equations for gas and vapor inside cavities
- Mass and energy conservation equations for gas and vapor inside the N2-gas tank

상기 지배방정식에 추가하여 도입된 관련 방정식은 다음과 같다.

- Evaporation and Condensation model at the water and gas-vapor interface
- Heat transfer rates between cavities, pressurizer cooler, reactor riser, steam and feedwater lines passing UAC
- N2-gas compressibility for the N2-gas inside cavities and N2-gas tank
- Gravitational head of water inside cavities
- Flow resistance at the N2-gas tank isolation valve

냉각재가 공동에 채워질 때 총 냉각재 질량에 대해 하나의 질량보존방정식의 해가 구해지며, 계산된 총 냉각재 질량은 각각의 공동의 체적 및 냉각재 밀도에 기초하여 분배된다. 총 냉각재 질량은 가압기 운전 원리에 따라 UAC, IC로부터 EC까지 분배된다. 그러나 에너지보존방정식은 각각의 공동에 대해 개별적으로 해가 구해진다.

나. 지배방정식

1) 가정

- Material is segregated in exactly two regions, one for liquid and one for water vapor/gas. Both regions are always present.
- The liquid pressure is equal to the total pressure
- Gas and vapor volumes are equal
- Gas and liquid temperatures may be unequal.
- The liquid is distributed among three cavities.

2) 보존방정식

The basic conservation of energy equation applies to regions with moving boundaries as well as those with fixed boundaries:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{w_{in}(h_m - h) - w_{out}(h_{out} - h) + q}{M} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dt}$$

For each of the three materials, the energy equations are:

$$\frac{dh_G}{dt} = \frac{w_{in,G}(h_{in,G} - h_G) - w_{out,G}(h_{out,G} - h_G) + q_{in,G}}{M_G} + \frac{1}{\rho_G} \frac{dP_G}{dt}$$

$$\frac{dh_V}{dt} = \frac{w_{in,V}(h_{in,V} - h_V) - w_{out,V}(h_{out,V} - h_V) + q_{in,V}}{M_V} + \frac{1}{\rho_V} \frac{dP_V}{dt}$$

$$\frac{dh_L}{dt} = \frac{w_{in,L}(h_{in,L} - h_L) - w_{out,L}(h_{out,L} - h_L) + q_{in,L}}{M_L} + \frac{1}{\rho_L} \frac{dP_L}{dt}$$

The basic conservation of mass equation is:

$$\frac{dM}{dt} = w_{in} - w_{out}$$

For each of the three materials, the conservation of mass equations are:

$$\frac{dM_G}{dt} = w_{in,G} - w_{out,G}$$

$$\frac{dM_Y}{dt} = w_{in,Y} - w_{out,Y}$$

$$\frac{dM_L}{dt} = w_{in,L} - w_{out,L}$$

We also need to find differential equations for the pressures. We integrate the differential equations to calculate P, h, and M for the three materials. We use state properties fits for steam and gas to calculate the densities.

3. 가압기 용량 및 성능평가에 영향을 미치는 인자

SMART 가압기 용량 및 성능평가에 영향을 미치는 인자중 상용로에 비해 계통 및 기기 특성은 아래와 같다.

- 원자로정지시의 경우 주냉각재펌프의 회전속도는 고속운전에서 저속운전으로 변환되도록 되어 있다.
- 원자로정지시의 경우 급수유량은 100%에서 5%까지 초당 10%씩 변환하도록 되어 있다.
- 주증기배관 차단시 이차측에 피동잔열제거계통이 작동한다(MSSV 및 ADV가 없다.).
- 증기우회 능력이 100% 될 수 있도록 설계되어 있다.
- 출력운전중 가압기 수위제어를 위한 별도의 냉각재 충전 및 유출이 없다.
- 능동 기기인 Spray, Heater가 없다.
- POSRV가 설치되어 있어 가압기 고수위시 밸브에 물/이상유체가 접촉해도 가능하다. 따라서 이 관점에서는 가압기 기체영역을 좀더 작게 설계하는 것이 가능하다.

4. 가압기 용량 및 성능평가 요건

기존 상용로의 가압기 용량 및 성능에 대한 적절성 여부의 평가는 EPRI URD의 가압기 체적에 대한 설계요건에 따라 평가할 수 있는데 이 설계요건을 만족시키는 범위 내에서 가압기 체적이 결정되어야 하며 그 내용은 아래와 같다.

- 부하상실시 비안전등급설비(제어계통)의 작동제어가 불가능한 상태에서 가압기 안전밸브에 물/이상유체가 도달되지 않아야 한다.
- 원자로정지 이후 비안전등급설비의 사용이 가능한 상태에서 가압기 전열기가 수면위로 노출되지 않아야 한다.
- 운전 과도상태시에 계통압력은 안전주입(SI)작동설정치 이상, 저압력원자로정지설정치 이상, 고압력원자로정지설정치 이하로 유지되어야 한다.

- 운전 과도상태시에 원자로냉각재계통 재고량은 저수위원자로정지설정치 이상, 그리고 안전주입작동설정치 이상 유지되어야 한다.
- 동력작동방출밸브(PORV) 및 가압기 안전밸브를 작동하지 않고 과압과도상태를 완화시킬 수 있도록 가압기 체적 및 살수 용량이 충족되어야 한다.

3.항에서 기술된 바와 같이 SMART의 경우 상용료에 비해 차이나는 설계특성이 있으므로, 상기 설계요건중 SMART에 해당되지 않거나 적합하지 않은 설계요건은 삭제하거나 수정하여 SMART의 가압기 용량 및 성능평가지 사용되어야 한다.

상용료와는 달리 SMART 가압기에 한해 적용되어야 하는 설계요건은 아래와 같다.

- 저온정지 상태(상온)로부터 정상 출력운전 상태로 가열될 시의 원자로 원자로냉각재 체적의 순증가량은 가압기(환형공동, 주변공동, 중앙공동) 체적 보다 작아야 한다. 단, 저온정지 상태(상온)시 원자로 원자로냉각재 수위는 주냉각재펌프 유로가 냉각재로 채워진 상태에서 환형공동 하단 이상으로 유지되도록 설계되어야 한다.
- 가압기 수위는 정상 출력운전시 및 과도 출력운전시, 그리고 설계기준사고시에도 중앙공동내에서 유지되어야 한다.
- 가스실린더의 체적은 정상 출력운전시 및 과도 출력운전시 계통압력에 의한 예비보호 신호를 발생시키지 않게 결정되어야 한다.

정상 출력운전시에는 가압기 수위가 정해져 있으므로(SMART는 가압기 중앙공동에 해당함.), SMART 가압기 중앙공동의 성능평가지는 중앙공동 체적을 냉각재체적 및 기체체적으로 나누어 각각 분석하여야 한다. 상기 설계요건을 종합해보면, 중앙공동 냉각재체적 및 기체체적 각각에 대한 가장 보수적인 평가 요건은 아래와 같다.

중앙공동 냉각재체적에 대한 평가 요건

- “원자로정지 이후 비안전등급설비의 사용이 가능한 상태에서 가압기 수위가 중앙공동 내에서 유지되어야 한다.”

중앙공동 기체체적에 대한 평가 요건

- 부하상실시 비안전등급설비(제어계통)의 작동제어가 불가능한 상태에서 중앙공동 최상부에 냉각재가 도달되지 않아야 한다. (예. MSIV 격리신호 + 제어계통 미작동 경우 중앙공동 최상부에 냉각재가 도달되지 않아야 한다.)
- 가압기 안전밸브를 작동하지 않고 과압과도상태를 완화시킬 수 있도록 가압기 체적이 충족되어야 한다. (예. MSIV 격리신호 + 제어계통 미작동 경우(보수적) 가압기 안전밸브가 작동하지 않아야 한다.)

5. 주요제한사건 선정 및 초기 조건

4.항에서와 같은 설계 요건을 만족하는 가압기 중앙공동을 설계하기 위해서는 주요제한사건(Most limiting event)을 선정하여 분석함으로써 설계 요건의 만족 여부를 평가하여야 한다. 가압기 중앙공동 액체체적 및 기체체적 분석시 주요제한사건으로는 각각 비

안전등급설비의 작동제어가 가능한 상태에서의 (상용로의 경우 가압기 수위제어에 긍정적인 영향을 미치는 비안전등급설비인 충전/유출 계통은 작동하지 않는 것으로 함. SMART의 경우 3.항에서와 같이 출력운전중 가압기 수위제어를 위한 별도의 냉각재 충전 및 유출이 없다.) 원자로/터빈 동시 정지 및 MSIV 격리신호 발생을 선정하여 분석을 수행하였다.

SMART의 중앙공동 성능평가를 위하여 설정된 일, 이차 계통의 초기 조건은 Table 1과 같으며 Table 1 이외의 내용은 아래와 같다.

- 증기발생기 열전달면적 : 26 m²/SG cassette
- 정격 출력시 급수 유량 : 24 kg/sec
- 정격 출력시 이차측 압력 : 3.5 MPa

- 원자로냉각재계통 고압력원자로정지설정치 : 16.7 MPa
- 비안전등급설비 작동 여부 : 주요제한사건 조건을 제외하고는 모두 작동함.

6. 가압기 중앙공동 성능평가

중앙공동 냉각재체적 분석 결과는 Figure 5와 같다. Figure 5는 SMART의 원자로/터빈 동시 정지시의 과도상태를 모의한 결과이며, 시간 변화에 따른 중앙공동 수위, 압력, 원자로 출력, 급수유량, 고온관 온도, 저온관 온도 등을 보여주고 있다.

중앙공동 수위의 경우 정상운전 수위는 약 50%로 설정되어 있는데, 원자로/터빈 동시 정지 이후 계속 수위가 내려가고 있으며, 약 12분이 지난 후에는 중앙공동 바닥이 드러나고 있는 것으로 나타나 있다. 이 결과 중앙공동 냉각재체적에 대한 평가 요건인 “원자로정지 이후 비안전등급설비의 사용이 가능한 상태에서 가압기 수위가 중앙공동내에서 유지되어야 한다.”는 요건을 충족시키기 위해서는 중앙공동 바닥이 드러나기 전에 중앙공동 수위제어를 위한 냉각재 충전이 요구되고 있음을 의미한다. 참고적으로 만일 초기에 원자로냉각재계통에 냉각재를 더 채운 후 가열운전을 시작하여, 정상운전 수위를 약 80%로 설정할 경우에는 약 19분이 지난 후에는 중앙공동 바닥이 드러날 것으로 예상된다.

한편 수위의 변화 추이와 유사하게, 압력도 원자로/터빈 동시 정지 이후 계속 내려가고 있으며, 약 13분이 지난 후에는 중앙공동 압력이 약 11 MPa에 도달하는 것으로 나타나 있다.

원자로정지시의 경우 급수유량은 100%에서 5%까지 초당 10%씩 변환하도록 되어 있으며, 이후 급수유량은 5%로 계속 공급되도록 되어 있다.

중앙공동 기체체적 분석 결과는 Figure 6과 같다. Figure 6은 SMART의 MSIV 격리신호 발생시(MSIV 격리신호 + 제어계통 미작동 경우(보수적))의 과도상태를 모의한 결과이며, 시간 변화에 따른 중앙공동 수위, 압력, 원자로 출력, 급수유량, 고온관 온도, 저온

관 온도 등을 보여주고 있다.

중앙공동 수위의 경우 정상운전 수위는 약 50%로 설정되어 있는데, MSIV 격리신호 발생시 약 6% 정도 상승하고 있음을 나타내고 있다. 이 결과 “부하상실시 비안전등급설비(제어계통)의 작동제어가 불가능한 상태에서 중앙공동 최상부에 냉각재가 도달되지 않아야 한다.”는 요건을 충분히 충족시키고 있는 것으로 평가되었다. 참고적으로 만일 초기에 원자로냉각재계통에 냉각재를 더 채운 후 가열운전을 시작하여, 정상운전 수위를 약 80%로 설정할 경우에도 상기 요건을 충족시키는데는 문제가 없을 것으로 예상된다.

중앙공동 압력의 경우 최고압력이 MSIV 격리신호 발생시 약 15.3 MPa를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 결과 “가압기 안전밸브를 작동하지 않고 과압과도상태를 완화시킬 수 있도록 가압기 체적이 충족되어야 한다.”는 요건을 충분히 만족시키고 있는 것으로 평가되었다. 즉 가압기 안전밸브의 개방압력인 원자로냉각재계통의 설계압력인 17 MPa에는 훨씬 못 미치는 것으로 평가되었다.

주증기배관 차단시의 경우 상용로와는 달리 이차측에 피동잔열제거계통이 작동하며 Figure 6에서의 중앙공동 수위, 압력 등의 거동은 이 계통의 작동으로 인한 추이를 나타내고 있다.

7. 결론

일반적으로 가압기 체적이 증대하면 발전소 운전 과도상태시 원자로냉각재계통의 수위 및 압력반응에 덜 민감하게 영향을 미칠 수 있으며 따라서 가압기 냉각재체적이나 기체체적의 설계요건에 좀 더 많은 여유도를 확보할 수 있다. SMART의 경우 가압기가 포함된 원자로냉각재계통이 원자로용기 내부에 위치하고 있으므로 상용로와는 달리 가압기 체적의 증가문제는 원자로냉각재계통의 기기 구성과 설계와 맞물려 용이하지 않다. 따라서 개념 설계된 가압기 체적으로 일체형원자로에 적합한 요건을 충족하면서 최적의 성능을 확보하는 것이 필요하다.

SMART의 원자로/터빈 동시 정지시의 가압기 중앙공동의 냉각재체적 분석 결과 총괄적으로 이차측을 이용한 원자로냉각재의 냉각율이 다소 큰 것으로 평가되었다. 발전소 운전자에 대한 조치 허용시간 내에 발전소 냉각 운전이 정상적으로 유지될 수 있도록, 원자로 정지시 냉각율의 영향 인자를 제어할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

SMART의 MSIV 격리신호 발생시 가압기 중앙공동 기체체적을 분석한 결과 6.항에서 기술된 2가지 설계요건을 충분히 충족시키고 있는 것으로 평가되었다. 특히 정상 수위가 80%일 경우도 중앙공동 최상부에 냉각재가 도달하지 않는 것으로 분석되었으며, 첨두 고압력 수치의 경우 상용로에 비해 단지 약 50% 정도(0.6 MPa) 만이 상승하는 것으로 분석되었다.

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
Surge 배관	
중앙공동과 중간공동 사이 배관 개수, 개	2
중간공동과 환형공동 사이 배관 개수, 개	6
가압기 습식단열재	
습식단열재 층 수, 개	20
습식단열재 한 층 (metal+water layer) 두께, mm	1.0(0.2+0.8)
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

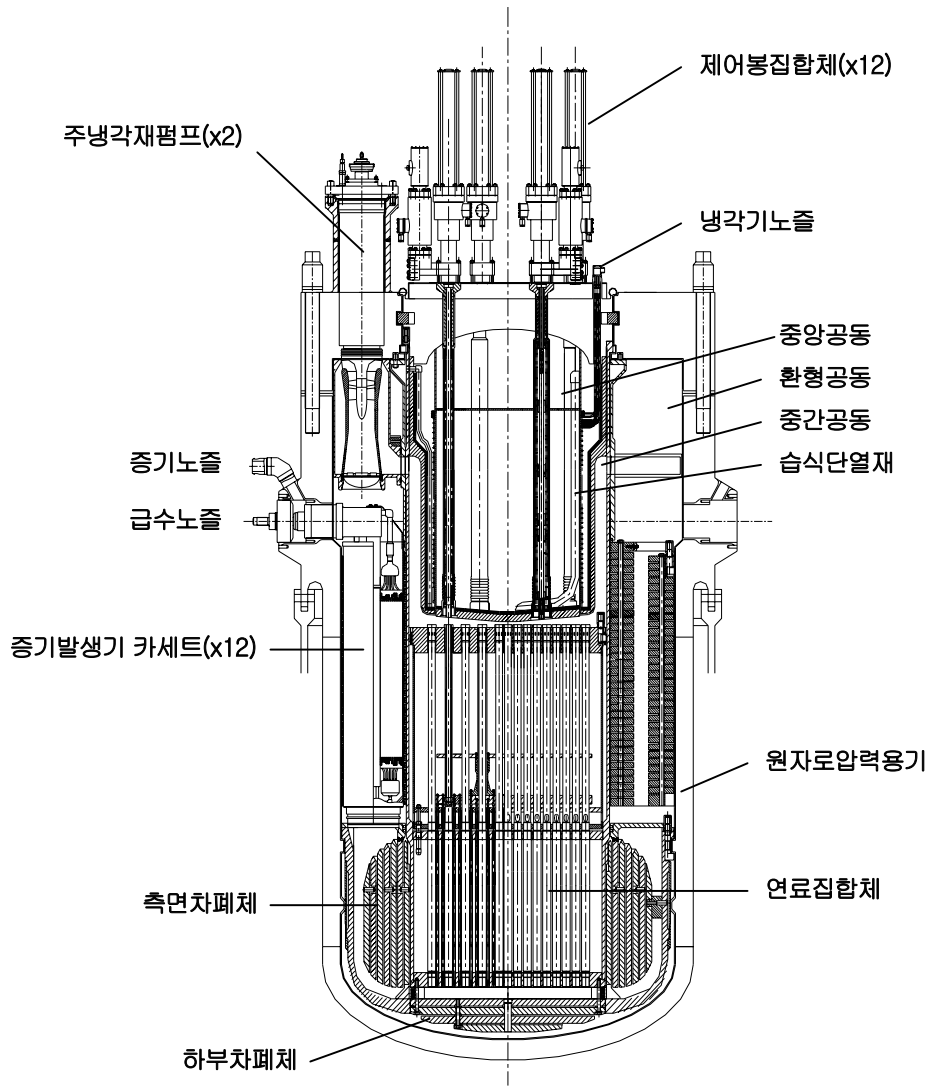


Figure 1. RCS Schematic Diagram

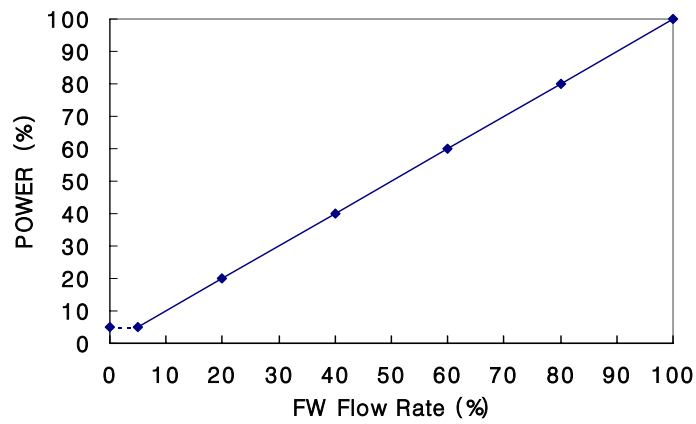


Figure 2. FW Flow Rate-POWER Control Program

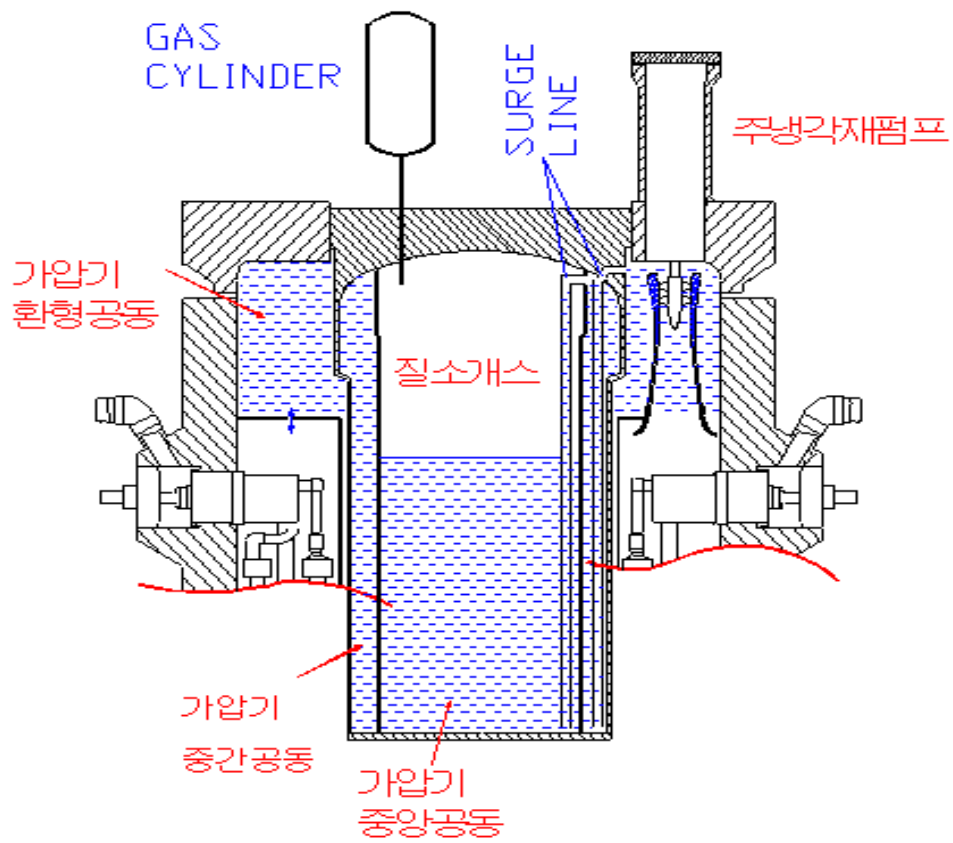


Figure 3. PZR Configuration

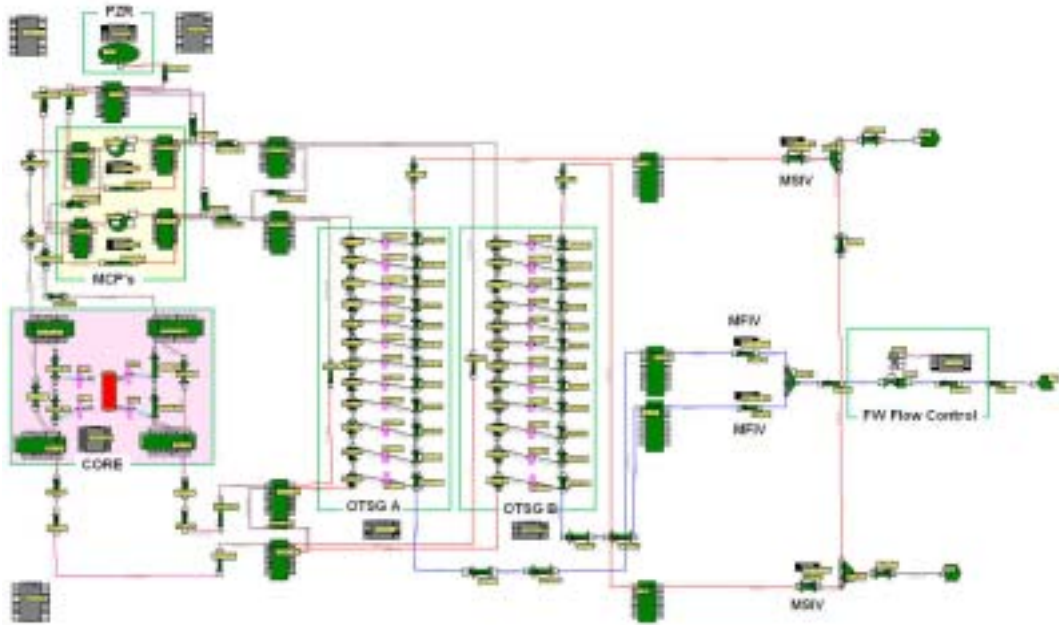


Figure 4. SMART MMS Model

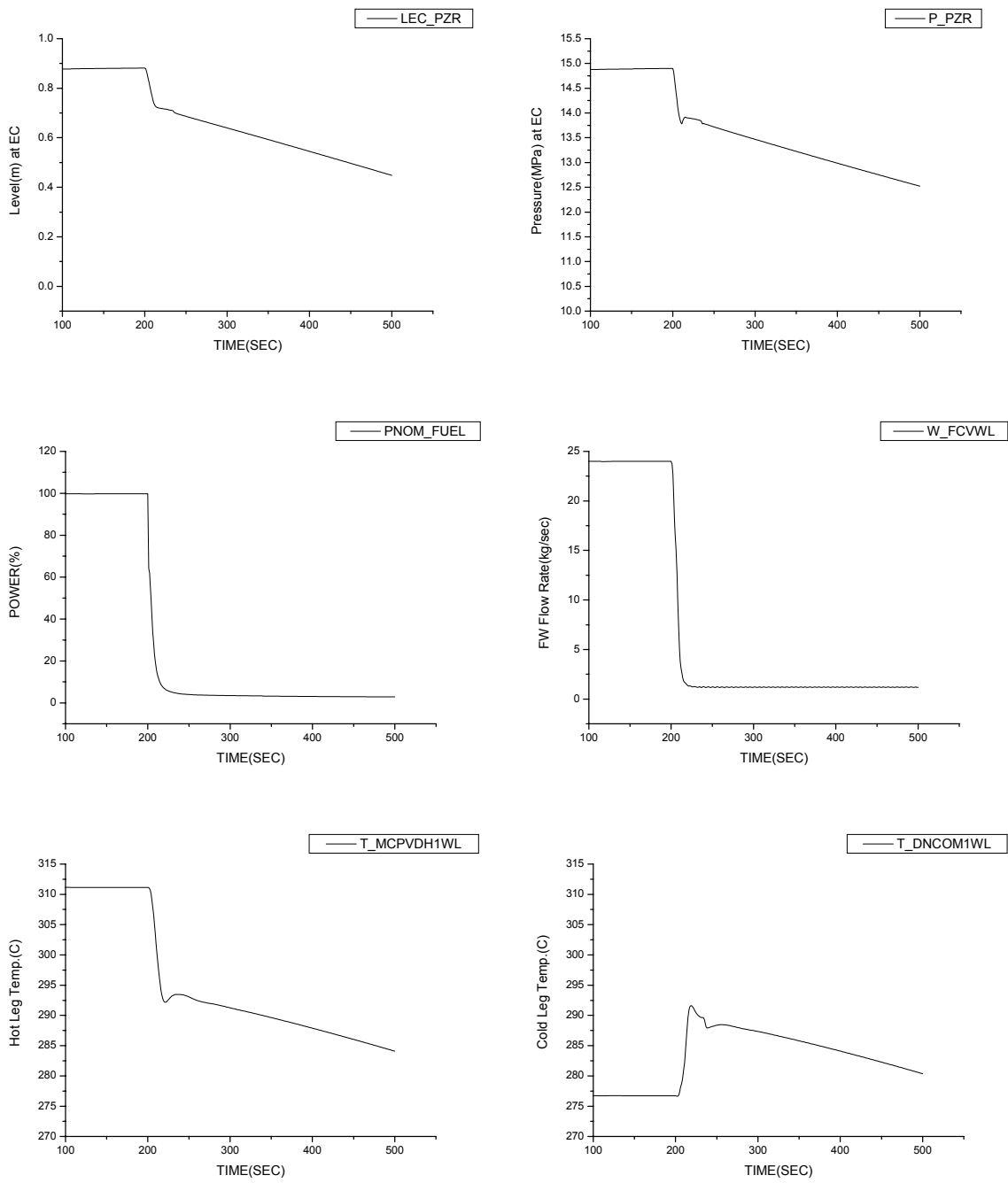


Figure 5. EC Level / EC Pressure / POWER / FW Flow Rate / Hot Leg Temp. / Cold Leg Temp. at RX/TBN Simultaneous Trip

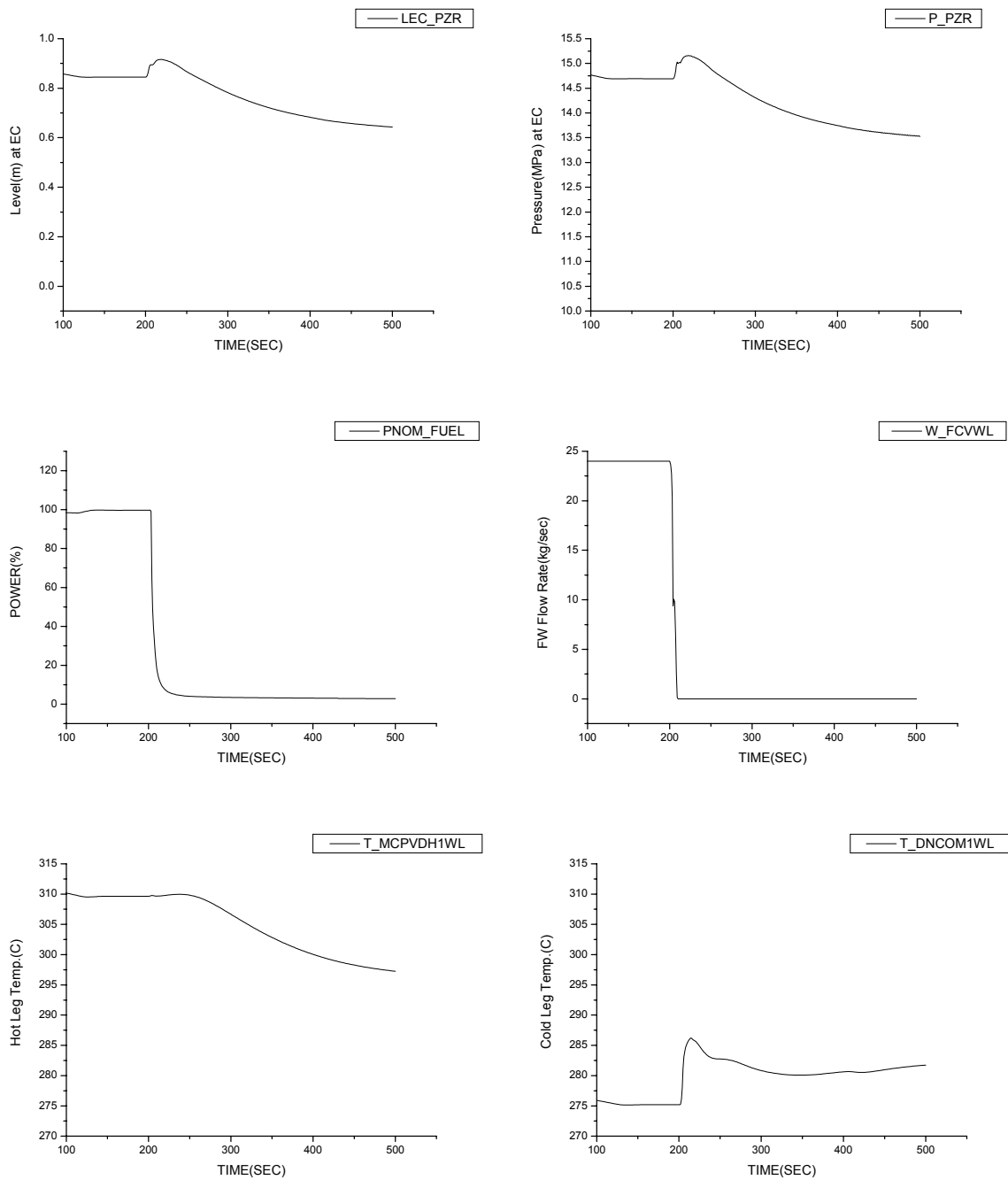


Figure 6. EC Level / EC Pressure / POWER / FW Flow Rate / Hot Leg Temp. / Cold Leg Temp. at MSIV Isolation Signal Occurrence

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력증장기개발 프로그램의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. "한국형 표준원전 계통 실무", 한국원자력연구소, 1996
2. "MMS Basic Manual", FTI, 1998.
3. "Description of the Developed or Modified MMS Modules for the SMART Model", SMART-MMS-005, Rev. 00, KAERI and FTI, 2000
4. "Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document", Vol. III, Chapter 3, EPRI
5. "UCN 3&4 PSAR", Chapter 4,5,7,9,10,15, KEPRI
6. "Korean Standard Nuclear Power Plant Safety Analysis Report", K-SSAR, Chapter 4,5,7,9,10,15, KEPRI
7. "System Description for Pressurizer Control System for YGN 3&4", 10487-IC-SD271, Rev. 01, KAERI, 1988
8. 이준 외, "한국형 차세대원자로의 가압기 및 관련계통 설계특성 분석", KAERI/TR-627/95, 1995
9. 이준 외, "피동형 신형원자로의 가압기 수위제어계통 설계특성 분석", KAERI/TR-616/95, 1995