

RETRAN을 이용한 차세대원전의 복수기 진공 상실 사고 해석

LOCV Accident Analysis of KNGR with RETRAN

김요한, 전황용, 이종범

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

EPRI에서 개발한 RETRAN 코드를 이용하여 차세대원전(KNGR)에서의 복수기 진공상실 사고(LOCV)를 하였다. 이를 위해 KNGR을 주냉각재펌프, POSRV 및 MSSV 등 LOCV 사고에 영향을 주는 기기들을 포함하여 59개의 볼륨과 78개의 정션으로 모델링하였으며, 노심 특성도 적절히 고려하였다. RETRAN-02/MOD005.2와 RETRAN-3D/MOD002a로 LOCV사고를 해석하였으며, 결과를 CESEC-III로 수행하여 기록된 KNGR 표준 안전분석 보고서의 자료와 비교하였다.

Abstract

The loss of condenser vacuum (LOCV) events for KNGR (Korean Next Generation Reactor) are evaluated using RETRAN code which is a thermal-hydraulic analysis code developed by EPRI. The main KNGR systems including four RCPs, four POSRVs and 20 MSSVs that could impact the LOCV events have been modeled as 59 volumes and 78 junctions. Also, the core characteristics of KNGR are considered in the model. The LOCV events have been analyzed using both RETRAN-02/MOD005.2 and RETRAN-3D/MOD002a, and the results have been compared with the KNGR SSAR which are the results of ABB-CENP's CESEC-III code.

1. 개요

한국전력공사에서는 '95년부터 차세대원자로(KNGR)를 개발하고 있으며, 이와 관련하여 각종 설계사고 해석을 수행한 바 있다. 본 연구에서는 EPRI에서 개발한 경수로용 열수력 해석 코드

인 RETRAN으로 KNGR의 성능 및 사고해석을 할 수 있도록 기본 입력을 구성하고, 이를 이용하여 기 수행된 사고해석중 복수기 진공상실(Loss of Condenser Vacuum, LOCV) 사고 해석 결과를 검증하였다.

기본 입력을 구성하기 위해 KNGR 표준 안전분석 보고서(Standard Safety Analysis Report, SSAR) 및 기타 설계자료를 기본으로 각종 볼륨(Volume)과 정션(Junction)으로 모델링하였다. 또한, LOCV 사고해석을 위해 해당 계통에 대한 각종 초기값과 설정치를 SSAR 제15장에 수록된 사고해석과의 정확한 비교를 위해 동일한 값으로 사용하였다.

본 연구에서는 RERAN-02/MOD005,2 및 RETRAN-3D/MOD002a를 사용하였으며, 수행한 해석 결과와 SSAR의 LOCV 사고 해석은 대체로 같은 경향을 보이고 있음을 검증할 수 있었다. 그러나, 몇 가지 중요 매개변수에 있어 차이점을 확인할 수 있었다. 또한 RETRAN-02와 -3D를 비교하여 같은 모델의 경우 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

2 시스템 모델링

KNGR을 모의하기 위해 주요 계통, 특히 LOCV 사고 관련 계통을 59개의 볼륨과 78개의 정션으로 모델링하였으며, 4개의 냉각재 펌프와 POSRV(4개), MSSV(20개) 등의 밸브 및 특성도 고려하였다. KNGR의 노심 특성을 반영하여 핵연료 집합체를 5개의 열전도체로 모델링하였고, 증기발생기(2개)의 전열관을 각각 5개의 열전도체로 표현하였다. 제어봉 Scram, 도플러 효과 및 붕괴열(Decay Heat) 등의 주요 노심 자료와 열전도계수, 선형확장계수 등의 열도체 상태량 테이블은 설계값을 사용하였다.

가. 볼륨 모델링

RETRAN에서는 원전 또는 원자로를 해석할 때 각 구성 기기들을 일련의 볼륨으로 모델링한다. 이 때 주요 입력값은 체적, 높이, 고도 등이며, 부수적으로 평균 상태량이나 단면적 등이 요구된다. 본 사고해석에서는 기존의 설계자료[1,2,3,4]를 바탕으로 입력값을 구했으며, 그 정확한 수치가 없을 경우에는 보다 보수적인 값을 사용하였다.

원자로 압력용기는 17개의 볼륨으로 모델링 하여, 노심내 냉각재 유동과 열전달 특성이 잘 반영될 수 있도록 하였다. 특히 노심은 5개의 볼륨으로 분할하였으며, 노심내 횡단류는 고려하지 않았다. 원자로내 유동장의 정확한 표현을 위해 SSAR 표 4.4-3에 표기된 값에 따라 우회유량(Bypass flow)을 안내관 우회유량 0.7% 등 총 4개 유로에 3%로 모델링하였다.

가압기는 RETRAN에서 제공하는 모델을 사용하였으며, 가압기 POSRV의 토출부를 위해 압력경계로 TDV(Time dependant volume)를 사용하였다. 이 TDV는 증기발생기 MSSV의 토출부와 터빈을 모델링하는 데에도 사용되었다.

고온관, 증기발생기 토출관, 저온관 및 RCP를 각각 1개의 볼륨으로 모델링하였다. 또한, LOCV

사고 같은 해석 시간이 짧고 압력 변화가 중요하며 증기발생기내 유동장의 형태나 재고량의 영향이 없는 경우에는 증기발생기 2차 측의 단순 묘사가 타당하므로 이를 1개의 볼륨으로 모델링하였다. KNGR 증기발생기의 전열관은 U자형과는 달리 Γ 형으로 비록 안쪽 전열관의 형태가 일부(내측 기준 17번까지) U자형이지만, 전반적으로 수직 및 수평부가 뚜렷하게 구분된다고 볼 수 있다. 그래서, 본 해석에서는 수직 부분을 4개로, 수평 부분을 1개의 볼륨으로 모델링하였다.

나. 밸브 모델링

KNGR의 가압기 POSRV는 총 4 개가 있으며 아래와 같은 용량을 요구한다.

- 최대 용량 : $630,000 \text{ lbm/hr} \times 4 = 175 \text{ lbm/s} \times 4 = 700 \text{ lbm/s}$ (2,575 psia 일 때)
- 최소 용량 : $540,000 \text{ lbm/hr} \times 4 = 150 \text{ lbm/s} \times 4 = 600 \text{ lbm/s}$ (2,500 psia 일 때)

본 연구에서는 이중 최소 용량 조건을 만족하기 위해 계산을 통해 밸브 크기(0.1009 ft^2)를 정했으며, 1개의 밸브로 모델링하였다. 개폐 압력은 SSAR에 나온 값(2463/2353)에 17 psia의 오차를 더하여 결정하였으며, 0.3초 지연후 1.7초간 Ramp형으로 열리고 닫히도록 모델링하였다. (그림 1, 2)

증기계통의 MSSV 는 각 SG당 10개, 총 20개가 있으며, 아래와 같은 만족해야 한다.

- 최대 용량 : $2,000,000 \text{ lbm/hr} = 555.56 \text{ lbm/s per Valve}$ (1,000 psia 일 때)
- 최소 용량 : $950,000 \text{ lbm/hr} = 263.89 \text{ lbm/s per Valve}$ (1,320 psia 일 때)

이중 최소 용량조건을 만족하는 0.19608 ft^2 (2개 밸브당)로 크기를 결정하였으며, 4 또는 8개의 밸브를 하나의 밸브로 표시하였다. 개방 압력은 설계값[2]에 1%의 오차를 고려하여 결정하였고, 1.0초간 Ramp형으로 열리고 닫히는 것으로 모델링하였다. 실제로 MSSV는 참고문헌 2에 나온 바와 같이 밸브의 설정치와 증기발생기의 압력비에 따라 특성곡선을 가지는 것으로 되어 있으나, 보수적으로 1.0초간 Ramp형으로 열리고 닫히는 것으로 가정하였다.

다. 주 냉각재 펌프 모델링

앞서 설명한 볼륨 모델링에서는 펌프의 기하학적인 데이터를 입력하고, 정션에서는 펌프의 입구와 출구임을 표시하여 펌프의 위치를 알린다. 그러나, 그 펌프의 수두(Head)나 토크(Torque) 등의 특성에 대한 자료는 별도로 입력해야 한다. RETRAN에서는 Bingham Pump NS-4200과 Westinghouse Pump NS-5200 에 대해서는 기본 자료를 제공하지만 두 펌프 이외의 경우에는 Centrifugal 펌프에 대해 여러 데이터를 넣게 되어 있다. 이 자료는 설계시 고려하고 있는 펌프의 공급사가 제공하는 것으로써 본 연구에서는 설계문서[2, 3]에 나와 있는 데이터를 사용하였으며, 단상 및 이상 유동에서의 Pump homologous curve를 표 형태로 입력하여 양상에서 모두 해석할 수 있도록 하였다.

라. 노심 모델링

본 연구에서는 노심을 Point reactor kinetics로 가정하여 해당 스텝에서 반응도(Reactivity)의

합에 의해 출력을 계산토록 하였다. 핵연료나 감속재의 온도 변화에 따른 반응도 피드백을 고려하였으며, 6개의 지발중성자군(Delayed neutron groups)을 사용하였다. 원자로 정지용 Scram 데이터는 설계자료에 나온 바와 같이 입력하였으며, 이 때 사용된 총 지발중성자비(β)는 0.0060 [1,2,3]으로 하였고, 지연시간 0.5초를 고려하였다. Doppler 효과에 따른 반응도는 SSAR와 마찬가지로 최소값을 사용하였다.

잔열 관계식은 1979년 ANS에서 제안한 잔열식[6]을 사용하였다. 1979 ANS 모델은 1973년에 제안된 모델을 보완한 것으로 보다 Robust한 계산을 할 수 있으며, 특히 비평형상태 원자로 운전에 대한 적용이 가능하도록 보완된 것이다. 이 모델에서는 U-235, U-238 및 Pu-239의 3가지 동위 원소에 대해 각각 23개 그룹의 매개변수를 사용하고 있으며, 악티나이드 계열인 U-239 및 Np-239의 영향도 고려하고 있다.

이상과 같이 KNGR을 모델링 하였으며, 이에 따른 주요 계통 분할도는 그림 3와 같다.

3. 사고 해석

가. 사고 해석 가정

LOCV 사고는 안전해석에 있어 '2차 계통 열제거원 감소 또는 상실'에 해당하는 사고로 복수기의 진공 상실에 따라 터빈 및 급수가 상실되어 일어나는 것을 가정하는 사고이다. EPRI에서 사고 해석 방법론인 RASP(Reactor Analysis Support Package, [7])에 따르면, CE형 원전의 경우 다음과 같은 가정을 할 수 있다.

- 인허가 관련 해석에 있어 터빈 정지에 따른 원자로 정지는 배제한다.
- 원자로 출력 컷백 계통(RPCS) 및 증기 우회 계통(SBS)의 기능 또는 작동을 배제한다.
- 외부전원 상실 및 유지에 대해 모두 해석한다.

그러나, 본 연구에서는 SSAR에서와 같이 외부전원 상실에 대한 해석은 수행하지 않았다. 이는 본 연구의 주요 관점중 하나가 1차측 POSRV의 개방지연에 따른 2차측 압력의 상승이기 때문에 1차측 열을 2차측으로 보다 많이 전달할 수 있도록 RCP가 가동중인 것으로 가정하는 것이 더 보수적이기 때문이다. LOCV 사고 해석에서의 주요 관점은 아래와 같다.

- 1차 계통 압력이 설계값의 110%를 초과하지 않아야 한다.
- 주증기계통 압력이 설계값의 110%를 초과하지 않아야 한다.
- CE-1 관계식을 사용할 때 과도상태에서 최소 DNBR값이 1.19이상이어야 한다.
- 최고 선형 열발생량이 21 kW/ft 이하이어야 한다.

3, 4번 재 항목은 유량 상실(Loss of Flow) 같은 다른 사고가 더 제한적이며, LOCV의 경우엔 1, 2번 재 항목인 1, 2차 계통의 압력이 타 사고에 비해 보다 제한적인 값을 제공한다.

나. 설정치 모델링

LOCV를 해석하기 위한 주요 변수의 설정방향은 다음과 같다.

- 높은 노심 출력 : 이는 열함유량을 높여 사고시 압력상승률을 최대로 하게 한다.
- 낮은 1차 계통 압력 : 가압기 압력을 낮춤으로 고압에 의한 원자로 정지까지의 시간을 지연시키는 효과가 있다.
- 높은 양(+)의 감속재 온도계수(MTC) : 노심 출력을 상승시켜 압력상승률을 높게 한다.
- 낮은 부(-)의 도플러 계수 : 핵연료 온도 상승에 따른 부 반응도 효과를 최소한으로 한다.
- 낮은 가압기 수위 : 역시 고압에 의한 원자로 정지를 지연시킨다.

본 연구에서는 이상의 기본 설정 방향을 기초로 SSAR에 나온 값을 사용하였다(표 1). 증기발생기의 초기 압력은 SSAR에 나와 있지 않기 때문에 SSAR작성을 위해 사용되었던 CESEC-III 코드 LOC Case deck의 초기치인 966,961 psia를 사용하였다. 2차측 압력경계로 쓰이는 터빈 입구 압력은 임의로 아주 낮은 값을 사용하고, 주증기관측과의 상실계수를 코드내에서 계산토록 하여 증기발생기의 압력을 필요에 따라 자유로이 조절할 수 있도록 하였다.

또한 앞서 설명한 바와 같이 밸브의 직경을 설계 최소 용량에 따라 설정하였으며, 개방 및 폐쇄 압력은 1%의 오차를 고려하여 상향 조정하였다.(표 2)

표 1. 초기 조건 요약

변 수	단위	SSAR	RETRAN
Initial Core Power	MWt	4062.66	4062.66
Core Inlet Coolant Temperature	°F	550	550.0
Core Mass Flow	10 ^b lbm/h	187,456	187,456
PZR Pressure	psia	2259	2259
Initial PZR Water Vol.	ft ³	1384	1384
SG Pressure	psia	966,961	966,961
SG Water Level	%(WR)	40.7	40.65

표 2. POSRV 및 MSSV 밸브 특성 요약

밸브	개수	설정 압력 (psia)	밸브용량 (lbm/s)	모델면적 (ft ²)
POSRV	4	2480.00	≤ 600.00	0.1009
MSSV Group A/B-#1	2	1211.55	≤ 527.78	0.19608
MSSV Group A/B-#2	2	1211.55	≤ 527.78	0.19608
MSSV Group A/B-#3	6	1272.15	≤ 1,583.33	0.58824

증기발생기 수위는 광역(Wide range) 및 협역(Narrow range)으로 표현되며, 각각의 상하 Tap사이의 높이에 따라 전체 폭에 대한 비율로 계산되며, 계속시에는 압력강하를 통해 산정된다. 본 해석에서는 증기발생기를 각각 하나의 Volume으로 모사하고 있으므로 단순히 물의 높이만으로 증기발생기의 수위를 산정할 수는 없다. 그래서 증발생기내 물 및 증기의 질량에 따라 수위를 산정하도록 제어 카드를 설정하였다. 증기발생기 보조급수는 증기발생기 저수위 신호 발생후 60 초 경과시 유입되도록 하였다.

다. 해석 결과

RETRAN(-02 및 -3D)을 이용한 해석 결과와 SSAR 제 15장에 나온 결과를 비교(표 3)하면, 대체로 SSAR에 비해 RETRAN의 사고 진행 속도가 늦다. 그러나, 사고의 가장 중요한 시점인 가압기 최고 압력, 원자로 냉각재계통 최고 압력 및 원자로 정지 등의 시간이 유사한 점을 볼 때 큰 차이는 없다.

원자로 정지 진행시간 이후의 사고 진행시간 차이는 주로 증기발생기내 Inventory, 즉 물의 양에 따른 것으로 이는 MSSV 개폐의 차이 때문인 것으로 보인다. SSAR의 경우 개방된 MSSV의 개수와 방출된 유량이 많으므로 증기발생기 내에 남은 물의 양이 RETRAN의 결과에 비해 매우 적어, 증기발생기에서의 압력 및 온도 변화 속도가 상대적으로 매우 빨라졌고, 이 경향은 1차측의 반응속도에 영향을 주고 있다. 반면에 RETRAN의 경우 상대적으로 적은 방출량 때문에 많은 Inventory를 확보하고 있어 비교적 완만한 변화를 보이고 있다.

표 3. RETRAN과 SSAR의 사고 진행시간 비교

사 건	SSAR		RETRAN		
	설정치	진행시간 (초)	설정치	-02 진행 시간 (초)	-3D 진행 시간 (초)
Loss of Condenser Vacuum (sec)	0.0	0.00	0.0	0.00	0.00
High PZR Press. (psia)	2,404	3.26	2,404	4.32	4.32
PZR POSRVs Open (psia)	2,480	4.26	2,480	5.64	5.64
Reactor Trip	-	4.41	-	5.47	5.47
MSSV Open (psia)	1,206.5	5.53	1,211.55	7.53	7.53
SG Low Level (%WR)	19.9	16.45	19.9	60.40	60.50
AFW Flow Initiated	-	77.90	-	120.40	120.50

해석 주요결과를 비교하면(표 4), 1차 측의 경우 양 쪽 모두 제한치인 설계압력의 110%, 즉 2,750 psia를 넘지 않고 있으나, RETRAN의 결과가 다소 낮다. 또한 RETRAN-02와 -3D를 비교해 보면 -02의 결과가 -3D에 비해 다소 낮다. 두 버전에 동일한 데이터 및 입력값과 계산 모델을 사용하였으므로, 이 차이점은 두 코드에서 사용하는 증기 상태량 방정식의 차이 때문이라 볼 수 있다. 이 점은 2상 유동이 존재하는 2차 측에서의 차이(그림 5)가 1차측에서의 것(그림 4)보다 두드러진 것을 보아도 알 수 있다.

2차측의 경우 RETRAN의 결과가 SSAR에 비해 현저히 높게 나오나 이 역시 제한치(1320 psia)를 넘지 않고 있으며, MSSV 개폐 설정 압력의 차이에 따른 것이다. 그러나, RETRAN의 경우 MSSV 개방 및 폐쇄 설정압력에 있어 SSAR에서 쓰인 0.5%보다 높은 1.0%의 보수성을 가지도록 모사하였으나 8개의 밸브만이 개방되었고, 1, 2차측 압력 제한치를 만족함을 볼 수 있다. 또한 방출 유량이 적어 증기발생기 2차측 Inventory를 보다 많이 확보하게 됨으로써 사고 진행 속도를 완화시키고 있음도 볼 수 있다.

표 4. RETRAN과 SSAR의 주요 결과 비교

사 건	SSAR	RETRAN-02	RETRAN-3D
1차측 최대압력 (psia)	2,744	2,671.89	2,671.95
2차측 최대 압력 (psia)	1,206.79	1,265.17	1,271.30
MSSV 개방 밸브 개수 (개)	20 (모든 그룹)	8 (그룹 #1,#2)	8 (그룹 #1,#2)
MSSV 최대 방출유량 (lbm/sec)	3,369	2,019	2,028
POSRV 개방 여부	개방	개방	개방

4. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구를 위해 KNGR에서의 각종 사고 및 성능 분석을 위한 RETRAN 기본 입력을 작성하여 검증할 기회를 가졌다. 또한, LOCV 사고에 대한 다른 각도에서의 검토를 할 수 있었으며, 보다 면밀한 분석을 통해 MSSV 개폐 설정 압력의 변경 가능성을 확인할 수 있었다. RETRAN-02와 -3D의 결과를 비교해 봄으로써 두 코드간의 차이점을 볼 수 있었으며, 사고 해석 결과를 재차 확인할 수 있었다.

향후 본 해석에서 사용한 입력과 결과에 대한 면밀한 재검토를 수행할 예정이며, 이에 따라 기존 SSAR에 대한 적절한 반영을 검토할 계획이다. 또한, SSAR 제 15장에 언급된 LOCV 이외의 타 사고에 대한 안전 및 성능 분석에 대한 RETRAN의 적용 가능성도 검토할 계획이다.

참고자료

1. KNGR SSAR 제 4, 5, 7, 10, 15장, 한국전력공사, 1999.
2. N0797-TA-CA008-00 (Rev.00), CESEC III Basedeck for KNGR Non-LOCA Safety Analysis, 한국전력공사, 1999.
3. N0797-FS-DD012-00 (Rev.00), Fluid Systems and Component Engineering Design Data for Plant Safety, Containment and Performance Analyses of KNGR, 한국전력공사, 1998.
4. N0797-ME-DD210-00 (Rev.01), Design Data for The Reactor Internals for KNGR, 한국전력공사, 1998.
5. EPRI NP-1850 (Rev.6), RETRAN-02 - A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flows Systems, EPRI, 1995.
6. EPRI NP-7450 (Rev.3), RETRAN-3D - A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flows Systems, EPRI, 1998.
7. EPRI NP-4498, The Reactor Analysis Support Package Vol. 3 PWR Event Analysis Guidelines, EPRI, 1986.
8. Handbook of Hydraulic Resistance (2nd ed.), I.E.Idelchik, et al., 1986.

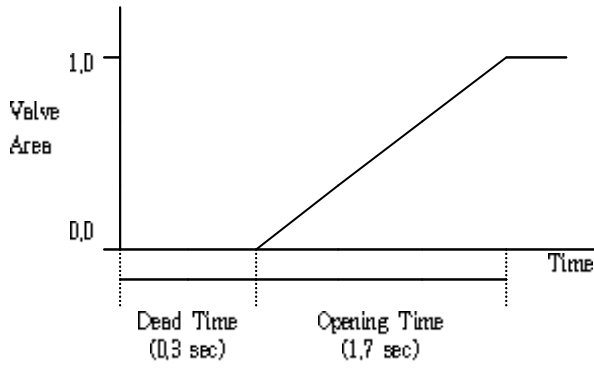


그림 1. POSRV 개방 특성 곡선

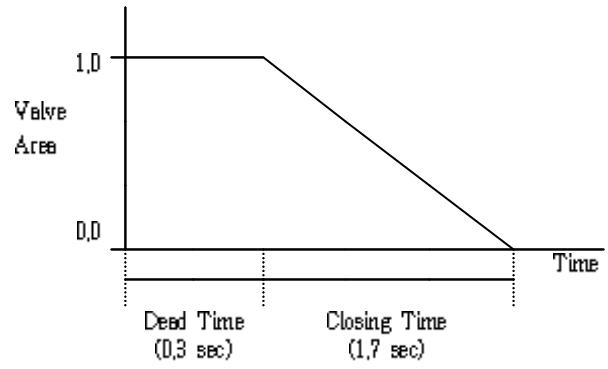
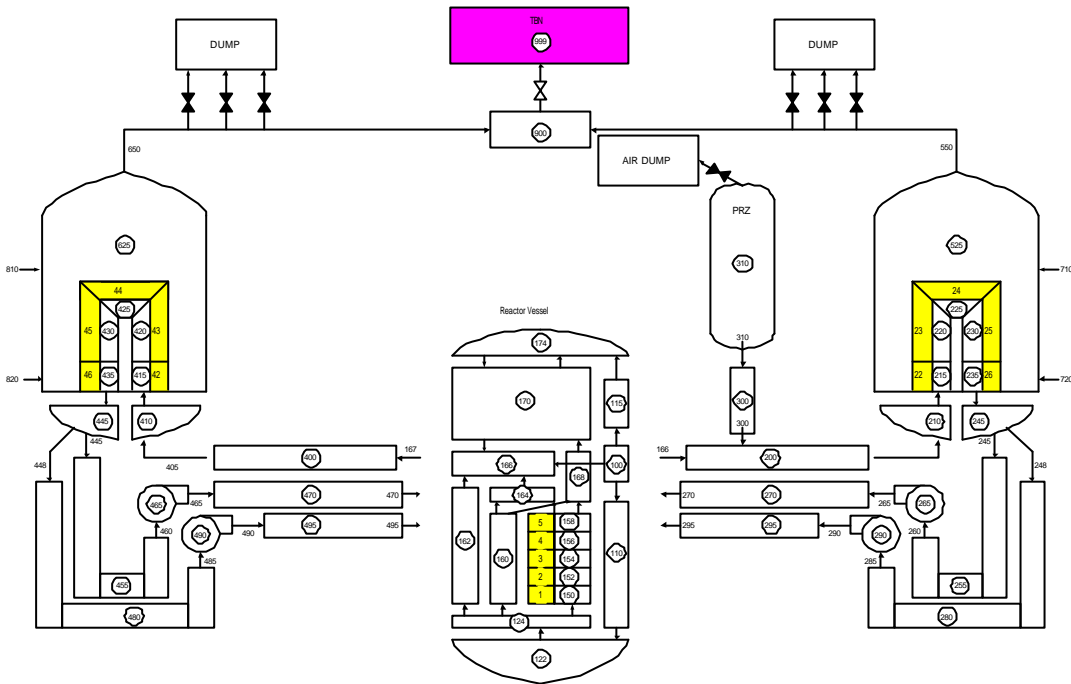


그림 2. POSRV 폐쇄 특성 곡선



KNGR Nodalization for RETRAN

그림 3. KNGR 분할도

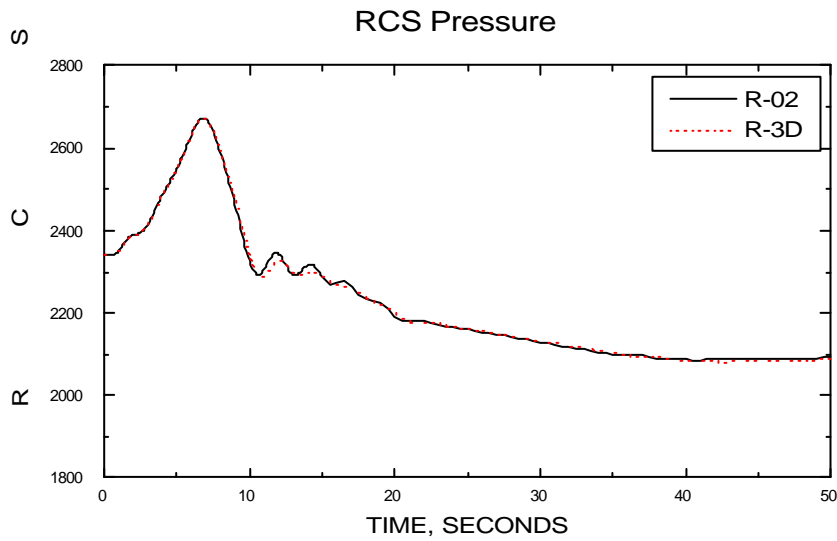


그림 4. 1차 계통 최대 압력 vs. 시간 (50초 까지)

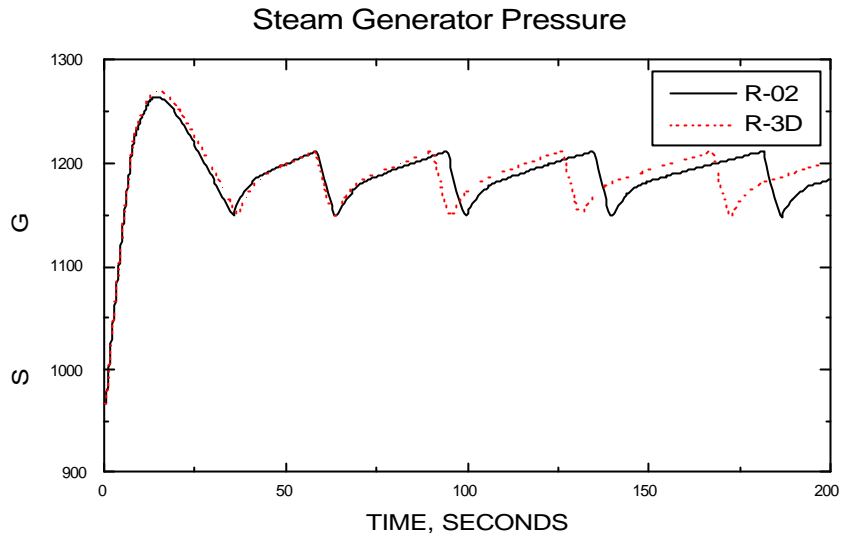


그림 5. 증기발생기 압력 vs. 시간

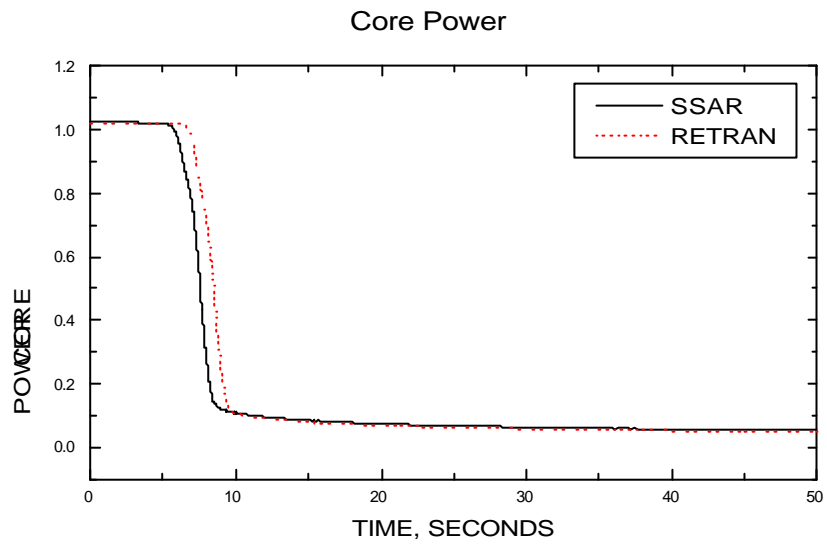


그림 6. 노심 출력 vs. 시간

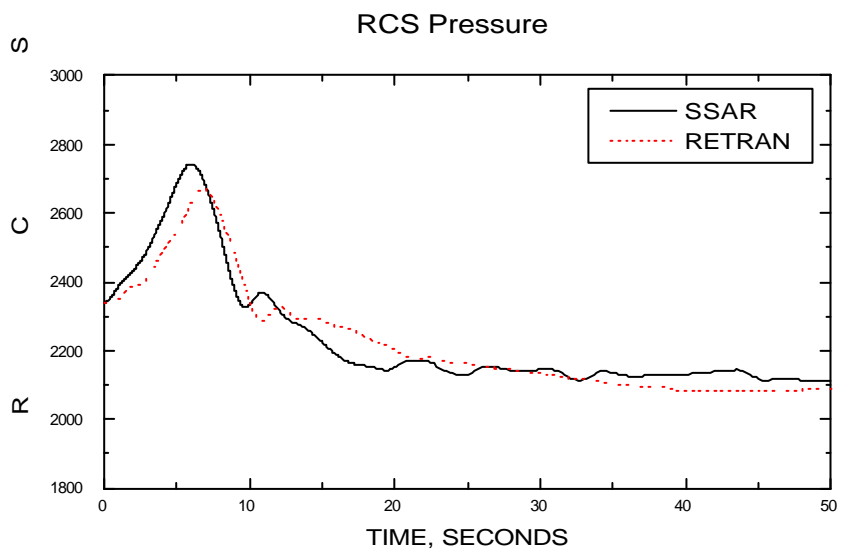


그림 7. 1차 계통 최대 압력 vs. 시간 (50초 까지)

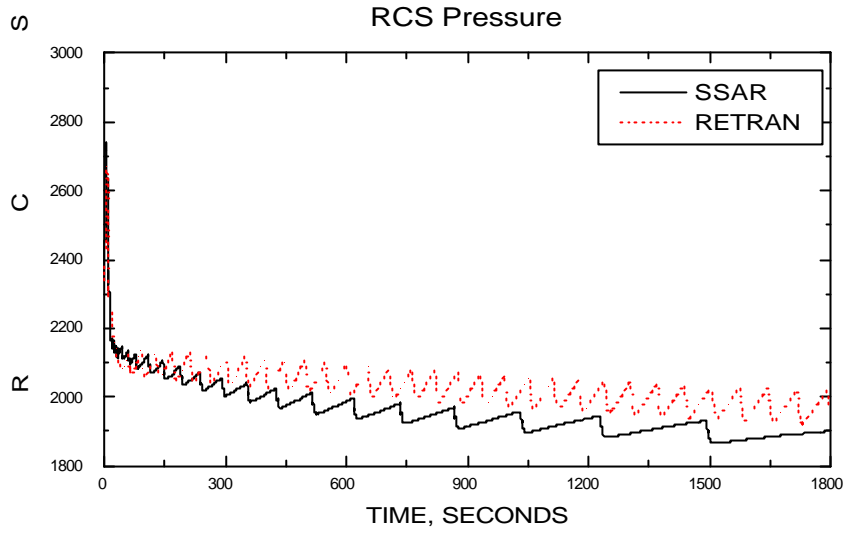


그림 8. 1차 계통 최대 압력 vs. 시간

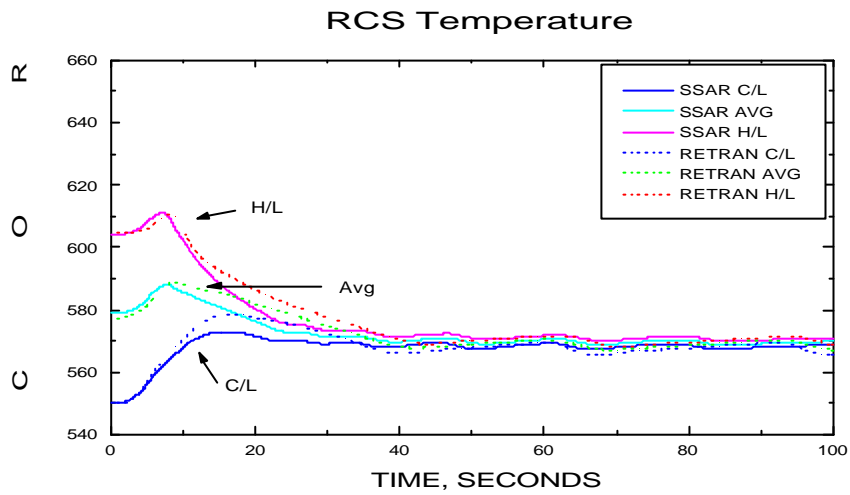


그림 9. 노심 온도 vs. 시간

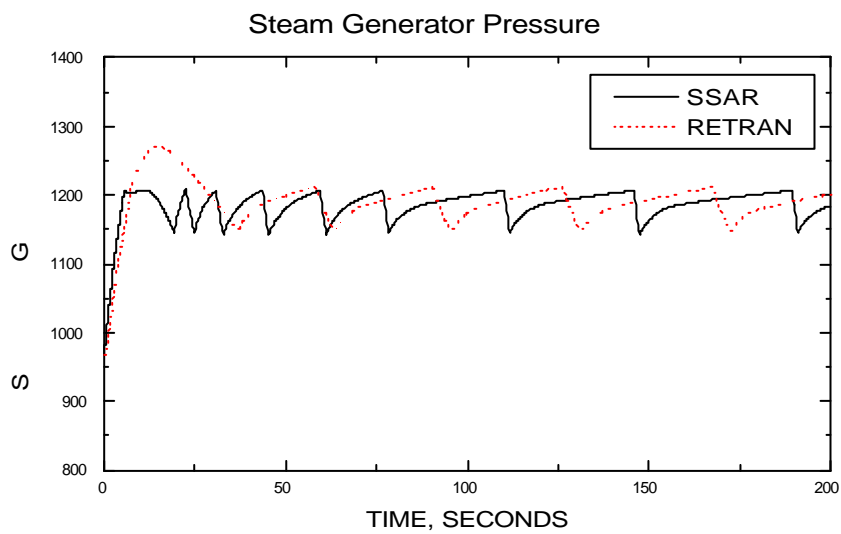


그림 10. 증기발생기 압력 vs. 시간