

원자력교육원 제 2 시뮬레이터 검증용 발전소 모델링

Plant Modeling for the V&V of KNPEC #2 Simulator

김요한, 전황용, 이동혁

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

전력연구원에서 개선 연구가 수행중인 원자력교육원 제 2 시뮬레이터 검증용 데이터를 생산하기 위해 최적 평가용 전산 코드인 EPRI의 RETRAN을 이용해 영광 1, 2 호기를 모델링하였다. 모델링을 위해 발전소 운전 자료와 설계자료를 활용하였으며, 필요시 고리 3, 4호기 자료를 활용하였다. 또한 원활한 계산 수행을 위해 PC용 RETRAN-3D를 개발 검증하였다. 개발된 모델을 이용하여 실제 발전소 운전자료를 모사함으로써 적정성을 확인하였다.

Abstract

The plant model of Yonggwang Unit 1 & 2 (YGN1/2) is developed using RETRAN of EPRI to generate the data for the validation and verification of KNPEC#2 simulator which has been upgrading by KEPRI. For the model the operation and design data of the plants is used and in some cases the data of Kori Unit 3 & 4 is used to fill up the lack of reference data. And the PC-version of RETRAN is developed and verified for more convenient calculation. The reactor trip event due to SIS of YGN2 is analyzed with the model and code, and the results have been compared with the plant data.

1. 개요

본 연구는 범용 최적평가 전산 코드로 EPRI사에서 개발한 RETRAN을 이용하여 한국전력공사에서 개선 연구가 수행중인 원자력교육원 제 2 시뮬레이터(KNPEC#2)의 검증용 데이터를 생산하기 위해 정상상태를 모델링한 방법을 기술하고 있다. 또한 이를 이용하여 '99. 6. 21. 발생한 영광 2호기의 안전주입에 의한 원자로 정지를 모의하여 발전소 자료와 비교하였다.

개선 연구가 수행중인 KNPEC#2의 성능을 평가하기 위해서는 많은 사건 시나리오에 대한 검증을 수행해야 하고, 이를 위해서 검증용 데이터가 필요하다. 검증용 데이터로는 실제 발전소의 정상 또는 과도 상태에서의 운전 데이터나 실증실험에서 취득한 자료를 사용해야 한다. 그러나 발전소 데이터는 그 사건의 종류와 양이 적고 실증 실험을 수행하기가 어려우므로 검증에 필요한 데이터를 별도로 생산해야 할 필요가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 발전소 과도상태를 최적 계산할 수 있는 최적평가 전산 코드인 RETRAN을 사용하여 발전소 과도상태 데이터를 생산하기 위한 기초 단계로 KNPEC#2에 해당하는 영광 1, 2호기의 정상상태를 모델링하고, 이를 이용하여 실제 운전 기록을 모의한 후 주요 변수를 비교하였다.

본 연구에서는 RETRAN-3D/MOD002a와 전력연구원에서 개발한 PC용 RETRAN-3D를 사용하여 해석과 모델링을 수행하였으며, 기본 입력자료는 해당 발전소인 영광 1, 2호기 운전 및 설계 자료를 활용하였다.

2 영광 1, 2호기 계통 모델링

영광 1,2호기를 적절히 모사하기 위해 발전소 주요 계통을 67개의 볼륨(Volume)과 78개의 정션(Junction)으로 모델링하였으며, 3개의 냉각재 펌프와 가압기 PORV, 증기발생기 방출 및 안전 밸브 등의 밸브와 그 특성도 고려하였다. 영광 1,2호기의 노심 특성을 반영하여 핵연료 집합체를 3개의 열전도체로 모델링하였고, 3개 증기발생기의 전열관을 각각 4개의 열전도체로 표현하였다. 제어봉 Scram, 도플러 효과 및 붕괴열(Decay Heat) 등의 주요 노심 자료와 열전도계수, 선형확장 계수 등의 열도체 상태량 테이블은 설계값을 사용하였다.

가. 볼륨 모델링

다른 격자분할(Nodal) 코드들과 마찬가지로 RETRAN에서는 원전 또는 원자로를 모델링하기 위해 각 구성 기기들을 일련의 볼륨과 정션으로 모델링한다. 이 때 볼륨의 주요 입력값은 체적(VOL), 높이(Zvol), 고도(ELEV) 등이며, 덧붙여 압력, 온도, 건도 등의 평균 상태량 값이나 단면적, 직경 등의 기하 자료가 요구된다. 본 연구에서는 기존의 영광 1, 2호기 설계 및 운전 자료를 바탕으로 입력값을 구성하였으며, 참고 자료가 미비한 경우에는 고리 3, 4호기의 자료와 설계사인 웨스팅하우스(WH)사의 문헌을 활용하였다.

원자로 모델링을 위해서 미국 WH사에서 V5H연료를 공급할 때 FSAR 개정을 위해 작성한 계산 근거를 바탕으로 원자로를 12개의 볼륨으로 분할하였으며, 주요 기하 자료 역시 이 때 사용한 값을 활용하였다. 또한 우회 유로의 적절한 모사가 가능하도록 필요시 높이를 조절하였다. 가압기는 코드 내에서 가압기 또는 습분 분리기용으로 제공하는 2상 비평형 모델을 사용하였으며, 터빈과 격납용기 및 복수기 등을 TDV(Time Dependent Volume)로 모델링하여 초기 정상 상태 계산시 압력 경계로 활용하였다. 고온관을 비롯한 배관은 배관 특성을 벗어나지 않는 범위에서 가능한 1개의 볼륨으로 모델링하였다.

증기발생기의 전열관은 U자형이지만, 전반적으로 수직부가 뚜렷하게 구분된다고 볼 수 있으므로 2×2, 4개의 수직부로 분할하였으며, 2차측은 정상 및 과도 상태에서의 정확한 거동 모사를 위해 5개의 볼륨으로 나눴다. 주증기관 계통은 구비 자료가 미비하여 기존의 고리 3, 4호기 해석에서 사용한 RETRAN 입력자료를 참고하였다.

나. 정선 및 밸브 모델링

가압기 분무기 2개를 통합하여 최대 용량이 72.6 lbm/sec이 되도록 오리피스 크기를 조절하였으며, PORV는 3개를 2개의 밸브로 모델링 하였다. 이 때 용량은 2,350 psia일 때 각각 58.33과 116.67 lbm/sec이 되도록 하였다. 안전밸브는 3개 각각 105.56 lbm/sec의 용량을 가진다. 증기발생기 PORV는 각 루프당 2개씩 있으나, 이를 1개로 합하였으며, 안전밸브는 루프당 5개를 각각 모델링하였다.

다. 노심 모델링

본 해석에서는 노심을 Point reactor kinetics로 가정하여 해당 계산 스텝에서 출력을 반응도 (Reactivity)의 합에 의해 계산토록 하였다. 핵연료나 감속재의 온도 변화에 따른 영향을 고려하였으며, 연료 설계 보고서에 나온 6개의 지발중성자군(Delayed neutron groups) 자료를 사용하였다. 잔열 관계식은 '79 ANS 모델을 사용하였다.

라. 수위 모델링

가압기 수위(Level) 실제 기기와 RETRAN 내에서 모델링된 볼륨사이에 차이가 있으므로 단순히 물의 높이를 계산한 값을 사용할 수 없다. 그래서 본 연구에서는 가압기내 물의 부피를 기반으로 수위를 아래와 같이 계산하였다.

$$\text{Level} = \{ (\text{가압기내 물의 부피}) - 84.3 \} / 1250.0 \times 100 \quad (\%)$$

RETRAN을 이용해 증기발생기를 해석할 때에는 분할과 압력강하 등 모델링에 의해 실제 기학적 자료와 코드 입력 자료간에 차이 발생한다. 그래서 코드에 의해 계산된 수위가 실제 증기발생기의 수위와 일치한다고 보기 어렵다. 본 연구에서는 증기발생기 설계용 전산 코드인 GENF로 해당 증기발생기(Model F)를 보다 상세하게 모델링하고, 일정 수위와 출력에 해당하는 물 및 증기의 질량을 산출하였다(그림 2). 산출된 재고량을 테이블 형태로 입력하여 RETRAN에서 계산된 질량과 비교함으로써 적절한 수위를 계산하도록 설정하였다.

마. 기타 제어계통 모델링

증기덤프 계통은 정상출력시 발생하는 증기의 70%를 터빈을 통과하지 않고 우회시켜 방출할 수 있도록 설계되어 있다. 덤프 밸브는 4개의 뱅크로 구분되며, 뱅크 1, 2는 복수기로 증기를 보내고, 뱅크 3, 4는 대기로 방출한다. 본 연구에서 사용된 RETRAN 입력에서 덤프 계통은 1개의

밸브로 설정하였으며 후단압력은 대기압으로 하였다. 덤프 밸브는 평상시 원자로 냉각재 Tav_g 신호에 의해 개도가 제어되는 Tav_g모드에서 작동되며, 기동운전 또는 저출력 운전시 주증기 헤드 압력을 제어하는 압력모드로 전환하기도 한다.

주급수량은 증기발생기 수위 제어 계통에 의해 결정된다. 수위 제어 계통은 증기발생기 수위 오차 신호 및 급수유량/증기유량 차이 신호에 의해 작동되며, 각 증기발생기에 공급되는 주급수 유량을 결정한다. RETRAN 모델에서 증기발생기별로 주급수 제어 계통을 모사하여 각 증기발생기에 적절한 유량이 공급되도록 하였다. 보조급수는 증기발생기 수위가 Lo-Lo Level에 도달하거나 안전주입신호가 발생되면 자동으로 공급된다. 고리 3, 4, 영광 1, 2호기에는 모터구동 보조급수펌프(용량 554 gpm/대) 2대 및 터빈 구동 보조급수펌프(용량 1082 gpm) 1대가 설치되어 있다. 본 모델에서 보조급수 유량은 증기발생기당 300 gpm으로 일정하게 공급되는 것으로 가정하였다.

제어봉 제어 계통은 원자로 출력, 터빈 출력, Tav_g 신호를 입력받아 제어봉을 삽입/인출하여 원자로 출력을 조절하며 10%의 출력 감발을 감당할 수 있다. 원자로 출력과 터빈 출력의 차이는 Impulse Unit을 통과하고 K1과 K2를 곱해 제어봉 속도 오차 신호에 입력된다. 루프별 Tav_g 신호중 제일 높은 값과 터빈 출력을 기준으로 구한 T_{ref}의 차이 역시 제어봉 속도 오차 신호에 입력된다. 제어봉 속도 오차 신호에 의해 제어봉은 8~72 step/min으로 인출 또는 삽입된다(그림 2). 본 연구에서는 실제 제어 계통과 같이 삽입과 인출 신호 사이에는 dead band를 설정하여 제어봉 인출/삽입의 반복을 방지하도록 하였다.

바. 압력강하 모델링

이상과 같이 볼륨 및 정션 등으로 모델링된 RETRAN-3D의 원전 계통을 실제 원전과 같은 조건으로 설정하기 위해 먼저 모델내 압력 강하를 조절하였다. 압력 강하에 대한 자료는 FSAR T.4.1-1에 나와 있으나, 그 값이 너무 포괄적이므로, V5H 연료 교체시 작성한 설계 자료를 참고로 중요 볼륨간 압력강하를 계산하여 RETRAN-3D 입력값을 조절하였다. 즉, 입력값중 볼륨의 단면적, 정션의 상실계수 등을 조절하여 설계 및 운전자료를 근거로 산출된 압력강하가 전산 코드 초기 계산에서 나올 수 있도록 하였다. 사용된 압력강하 산출량과 RETRAN-3D 초기 계산에서 계산된 값은 다음 표와 같다.

표 1. 압력강하 설정 요약표

시작 볼륨	도착 볼륨	산 출 값	계 산 값	시작 볼륨	도착 볼륨	산 출 값	계 산 값
260	100	10,607	10,607	160	170	0,672	0,67951
100	120	5,8905	5,8910	170	200	1,5435	1,5396
120	130	0,8505	1,7213	200	210	4,30	4,2206
130	140	3,1185	3,1171	210	230	28,9	28,910
140	144	23,289	23,291	230	240	5,17	5,1698
144	160	3,423	3,4160				

이상과 같이 영광 1/2호기를 모델링 하였으며, 이에 따른 분할도는 그림 1과 같다.

3. PC용 RETRAN-3D 개발, 검증

시뮬레이터 검증용 데이터 생산을 원활히 하고, 필요시 관련 부서나 발전소에서 쉽게 활용할 수 있게 하기 위해 본 연구에 있어 주로 사용되는 전산코드인 RETRAN-3D/MOD002a를 개인용 컴퓨터(PC)에서 사용할 수 있도록 개발하였다. 개발된 PC용 코드는 기존 워크스테이션에서와 동일한 기능을 가지고 있으며, 향후 실시간 그래픽 연동을 위해 일부 출력 구조를 수정하였다. 개발된 코드는 EPRI에서 제공하는 검증용 예제 및 표준 결과 비교하고, 자체 수행한 바 있는 사고 해석 사례를 수행해 봄으로써 검증하였다.

표 2. 검증 수행 요약

예	제	계 산 실시간 (초)	비 교 데이터 수	HP9000/735	PC	
				처리시간 (초)	처리시간 (초)	평균 상대 오차
1	Standard Problem One	0.46	100	1.88	1.54	1.6937E-8
2	ECC Injection Problem	5.00	736	2.86	1.81	1.9789E-8
3	Standard Problem Five	5.00	196	3.30	3.18	2.2653E-8
4	Standard Problem Four	1.00	180	3.58	2.31	2.3304E-8
5	Turbine Trip without Bypass (Point Kinetics)	2.00	372	6.74	4.23	3.2991E-8
6	Uncontrolled Rod Withdrawal	3.00	216	2.61	1.54	7.4558E-5
7	Two-Dimensional FlowField	0.10	95	0.63	0.49	1.9503E-8
8	Secondary Side Problem	0.50	240	20.93	12.03	1.9740E-8
9	TBN Trip without Bypass (Space-Time Kinetics)	1.00	210	12.09	5.38	1.2529E-8
10	PWR ATWS Problem	150.0	1,156	31.50	17.80	1.1229E-4
11	Three Component Flow Test	20.0	246	7.67	3.18	3.2470E-5
12	Water Over Air/Steam	25.0	546	62.03	28.34	7.9902E-4
13	LOCV of KNGR	1000.0	N/A	596.45	277.16	N/A

본 검증을 통해 개발된 PC용 RETRAN-3D를 시뮬레이터 검증용 데이터 생산을 비롯한 원전 성능해석용 전산 코드로 활용할 수 있음을 확인하였다.

4 영광 2호기 안전주입에 따른 원자로 정지 모사

가. 사건 개요

개발된 영광 1,2호기용 RETRAN 기본 입력을 이용하여 '99. 6. 21. 발생한 영광 2호기 주증기관 압력 계기계열 오동작에 따른 안전주입 신호 발생에 의한 발전 정지를 모사하였다. 이 사건은 전출력운전(원자로 100%, 터빈-발전기 968MWe) 상태에서 공학적 안전 설비계통 주증기관 압력기 계열 기능시험중(월간 정기 시험) 연계된 다른 계열의 전자 회로판 고장으로 주증기관(A루프) 저압력 신호에 의한 안전주입 신호가 발생하면서 원자로와 터빈-발전기가 정지된 것이다.

안전주입 신호는 공정제어계통 P-476 채널 시험 도중 동 계통 P-474 채널의 오동작으로 2/3 논리조건이 충족되면서 발생되었다. 사건 시작을 시점으로한 주요 진행 사항은 다음과 같다.

표 3. 사건 진행 사항

시간 (초)	발생 신호	비 고
-	PB-476B 시험 시작	16:58:05
0.	PB-476B 증기발생기#1 증기관 저압 (채널 4)	
41.57	PB-474B 증기발생기#1 증기관 저압 (채널 2)	오동작, 2/3 충족
-	증기발생기#1 증기관 저압에 따른 SI 신호발생	
41.59	안전주입 계통 구동	펌프 기동
41.65	원자로 정지 계통 기동	
41.72	터빈 정지 계통 기동	
156.77	안전주입 계통 정지	수동, 펌프 정지

나. 사건 모사

먼저 사건 당시 주입된 안전주입 유량에 대한 자료를 확보할 수 없어 전력연구원에서 발간한 '최적 ECCS 유량계산 방법론 개발 및 사고해석 초기 조건'에 나와 있는 고리 3/4호기용 안전주입 유량을 활용하였다.

표 4. 최적 안전주입 유량

RCS 압력 (psig)	유 량 (gpm)	RCS 압력 (psig)	유 량 (gpm)	RCS 압력 (psig)	유 량 (gpm)	RCS 압력 (psig)	유 량 (gpm)
0	215.7	600	189.0	1200	157.4	1800	116.8
200	207.3	800	179.3	1400	145.2	2000	100.3
400	198.3	1000	168.9	1600	131.7	2200	81.2

발전소에서 출력운전중 원자로 또는 터빈-발전기가 정지하는 사건이 일어나면, 덤프는 Tav_g 모드로 작동된다. 그러나 대개의 경우 잠시후 운전원이 압력 모드로 전환하여 덤프를 조절한다. 본 모사에서는 덤프계통을 적절히 모사하기 위해 트립카드를 이용하여 덤프 모드를 전환하도록 하였으며, 이 시간을 사건 시작후 90초로 설정하였다. 이후 덤프 밸브를 조절하여 2차측 압력을 조절하도록 하였다.

사건을 1000초까지 모사한 결과 1차 계통에 있어 가압기 압력은 대체로 사건 보고서에 기록된 값과 일치하고 있으나, 수위에 있어 다소간의 차이를 보이고 있다. 이는 사건 발생시 추출계통의 운전상태와 정확한 안전주입 유량에 대한 자료가 부족한 때문인 것으로 보인다. 2차 계통 압력은 초기 급변하는 부분을 제외하고는 대체로 경향을 잘 반영하고 있으나, Tav_g 모드 덤프의 급속한 반응과 덤프 모드를 전환하는 부분에 다소 수정이 필할 것으로 보인다. 증기발생기 수위는 500초 이후 많은 차이를 보이고 있다. 이는 본 연구에서 채택한 재고량에 따른 수위 계산 방법

이 다소 실제 증기발생기 현상과 차이를 보이고 있는 것으로 판단되므로 협역 수위가 아닌 광역 수위에 대한 자료를 입수하여 검토해야할 것으로 보인다.

5. 결론 및 향후 연구 계획

앞서 언급한 바와 같이 본 연구는 개선 연구중인 원자력교육원 제2 시뮬레이터의 검증용 자료를 생산하기 위한 RETRAN 해석 시스템을 구축하기 위해 시작되었다. 현재 기본 모델을 작성하고 이에 대한 검증을 수행중인 만큼 최근 있었던 영광 1호기 12주기 기동운전을 포함하여 보다 많은 실제 발전소 자료를 통해 보완하는 한편 검증용 시나리오를 개발할 계획이다. 현재 계획중인 주요 검증용 사건은 최대 연속 출력 변환 (100 - 75 - 100%) 등 10개 사건이며, 이 이외에도 실제 발전소 운전 자료를 통한 검증도 병행할 계획이다.

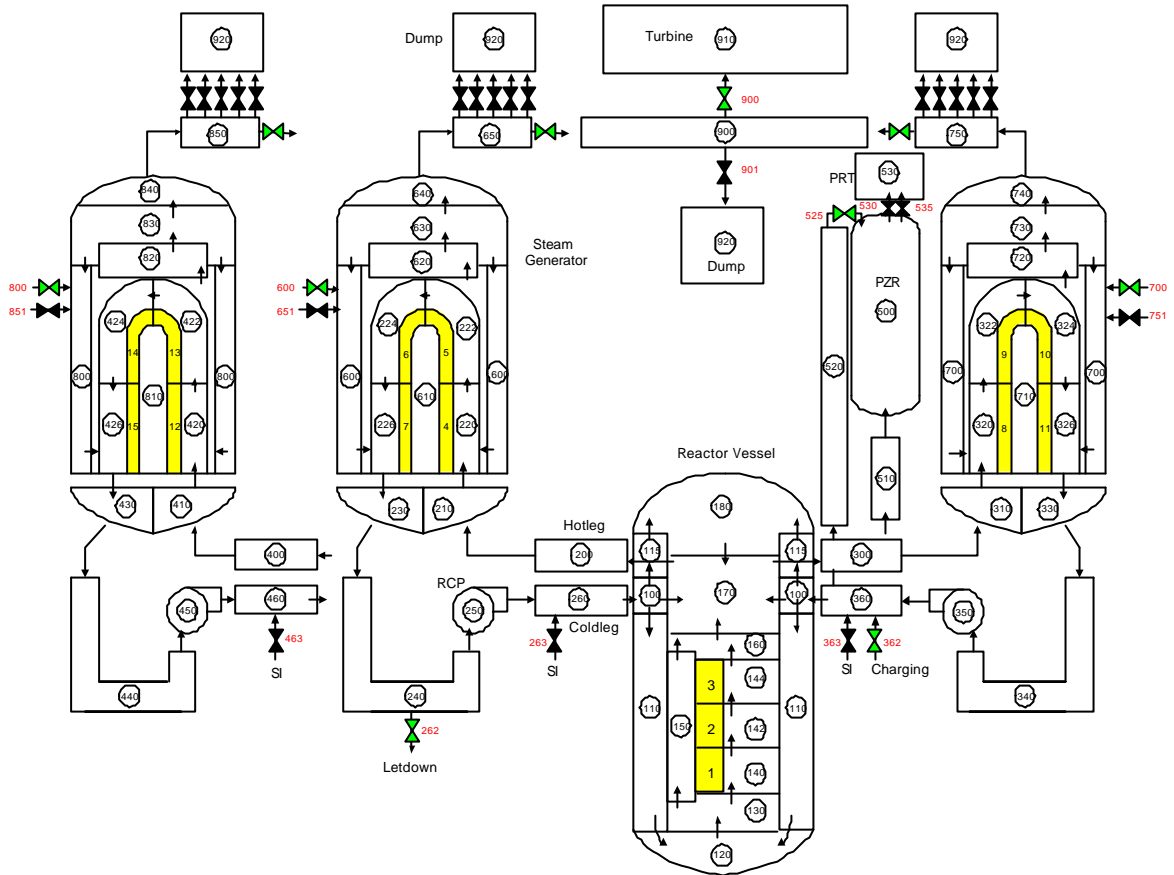
표 5. 시뮬레이터 검증용 사건

- 최대 연속 출력 변환 데이터 생산	- 소형 LOCA 데이터 생산
- 대형 LOCA 데이터 생산	- 증기발생기 전열관파열 데이터 생산
- 주증기관 파열사고 데이터 생산	- 급수상실 + ATWS 데이터 생산
- 가압기 SV 고착 열림사고 데이터 생산	- TMI 사고 시나리오 데이터 생산
- 모든 AC 상실사고 데이터 생산	- 부분충수운전 데이터 생산

또한 향후 본 연구를 통해 개발된 검증용 모델을 발전소 성능해석 업무 지원에 활용할 계획이며, 안전해석 기초 자료로 활용할 계획이다.

참고자료

1. 영광 1, 2호기 FSAR 제 4, 5, 7, 10, 15장, 한국전력공사
2. 영광 1, 2호기 PLS, 한국전력공사, 1988
3. 최적 ECCS 유량 계산 방법론 개발 및 사고해석 초기조건, TM99NS06.P1999.438, 전력연구원, 1999
4. PC용 RETRAN-3D 개발 및 검증 보고서, TMS05.R1999.368, 전력연구원, 1999
5. ANSI/ANS-5.1-1979, Decay Heat Power in Light Water Reactors, ANS, 1979
6. EPRI NP-1850 (Rev.6), RETRAN-02 - A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flows Systems, EPRI, 1995
7. EPRI NP-7450 (Rev.3), RETRAN-3D - A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flows Systems, EPRI, 1998
8. Flow of Fluids through Valves, Fittings, and Pipe, CRANE Co., 1988
9. WCAP-10348, Setpoint Study Korea Electric Company Units 5&6, Westinghouse Electric Corporation, 1983
10. 원자력교육원 교재 계통-6 증기발생설비, 한국전력공사, 1988



YGN 1/2 Nodalization for RETRAN

그림 1. RETRAN-3D용 영광 1,2호기 분할도

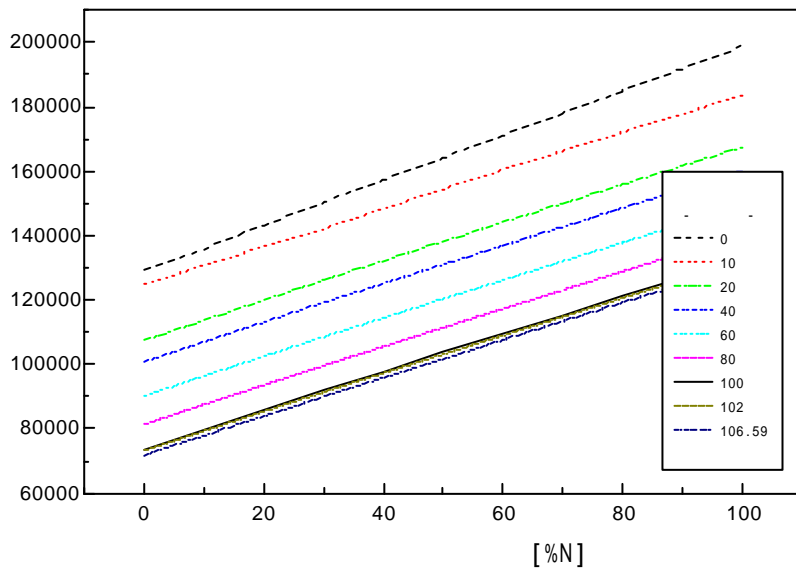


그림 2. 출력에 따른 증기발생기 수위에 대한 재고량

ROD SPEED PROGRAM

Rod Speed
(Steps/Min)

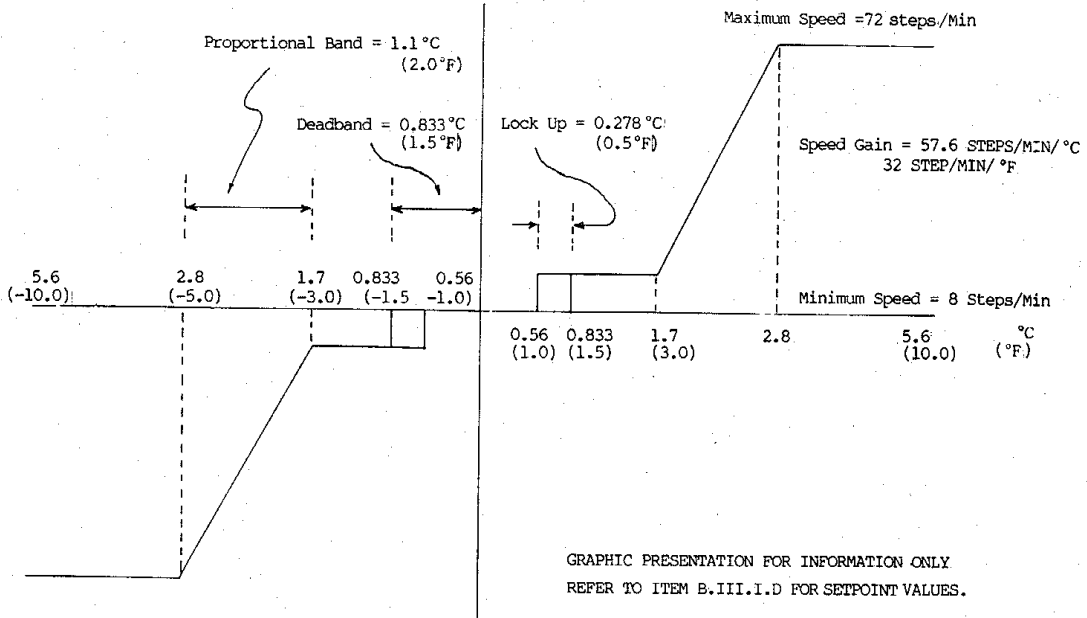


그림 3. 제어봉 속도 프로그램

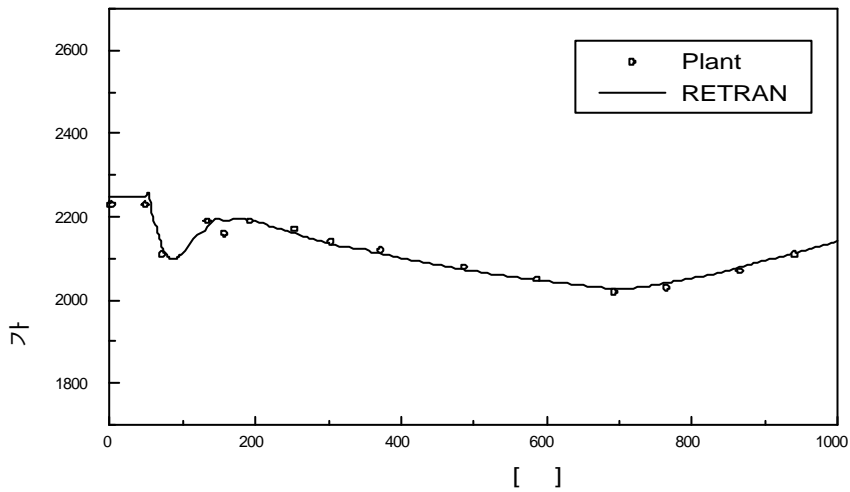


그림 4. 가압기 압력 변화 비교

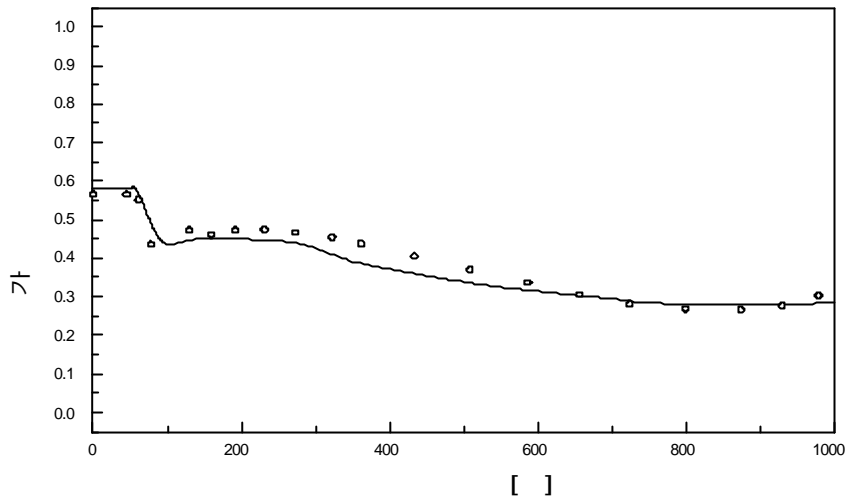


그림 5. 가압기 수위 변화 비교

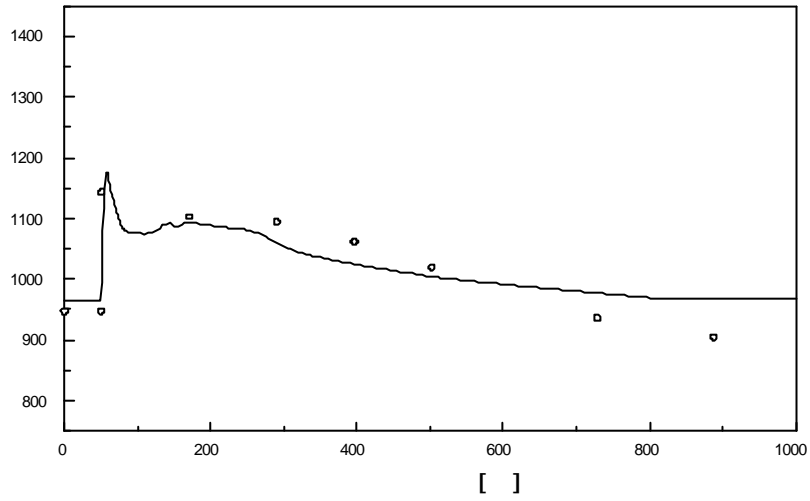


그림 6. 증기발생기 압력 변화 비교

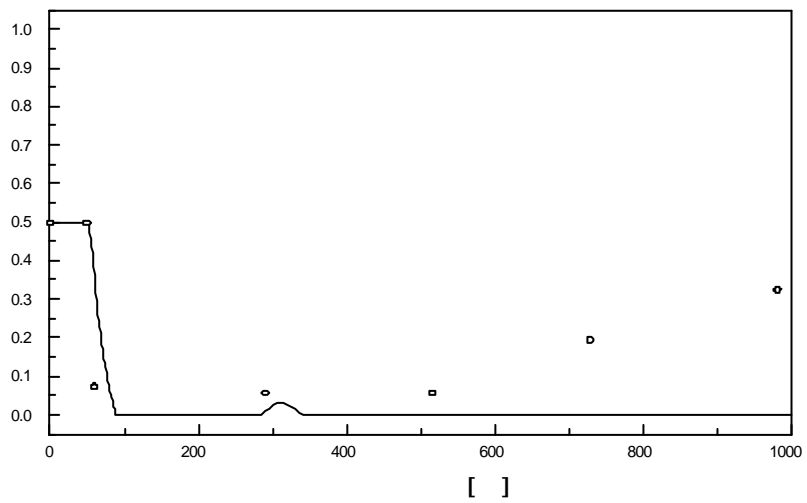


그림 7. 증기발생기 수위 변화 비교