



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2018년 2월
석사학위 논문

WH1000형 원전의 보조급수계통 유효성 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 경 우

WH1000형 원전의 보조급수계통 유효성 연구

A study on the effectiveness of Auxiliary feedwater
system in WH1000 type NPP

2018년 2월 23일

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 경 우

WH1000형 원전의 보조급수계통 유효성 연구

지도교수 : 이 경 진

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2017년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 경 우

이경우의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정운관 (인)

위원 조선대학교 교수 김진원 (인)

위원 조선대학교 교수 이경진 (인)

2017년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	vi
제 1 장 서 론	1
제 2 장 WH1000형 및 OPR1000형 원전의 증기발생기 비교	3
제 1 절 WH1000형 원전 증기발생기	3
1. 일반사항	3
2. 설계사양	4
3. 증기발생기 수위제어	4
제 2 절 OPR1000형 원전 증기발생기	11
1. 일반사항	11
2. 설계사양	13
3. 증기발생기 수위제어	13
제 3 장 WH1000형 및 OPR1000형 원전의 보조급수계통 비교	18
제 1 절 WH1000형 원전 보조급수계통	18
1. 보조급수펌프 사양	18
2. 계통운전	18
제 2 절 OPR1000형 원전 보조급수계통	20
1. 보조급수펌프 사양	20
2. 계통운전	20
제 4 장 증기발생기 고수위 발생시 발전소 영향검토	23
제 1 절 증기발생기 고수위의 정의와 조치절차	23
제 2 절 증기발생기 과충수의 부정적인 영향	24
1. 응축에 의한 수격현상	24

2. 과도한 중력하중	24
3. 밸브의 개방 고착	24
4. 터빈구동 보조급수펌프 터빈고장	25
5. 축척된 물의 가속	25
제 5 장 WH1000형과 OPR1000형 원전 비교분석	26
제 1 절 증기발생기 차이점 분석	26
제 2 절 보조급수계통 차이점 분석	27
1. 보조급수펌프	27
2. 보조급수제어	27
3. 보조급수 동작신호	28
제 6 장 WH1000형 원전의 보조급수계통 유효성 연구	29
제 1 절 연구 목표	29
제 2 절 연구 방법	29
1. 절차서 검증	29
2. 중점 관찰사항	30
제 3 절 연구 결과	31
1. 원자로냉각재펌프(RCP) 정지 후 원자로냉각재 온도(T_{avg}) 변화	31
2. 모든 교류전원 상실시 SG 수위 변화	32
3. 증기발생기 관과열시 SG 수위 변화	34
제 4 절 개선방법	36
1. RCP 한 대 정지시 T_{avg} 감소에 대한 개선방법	36
2. 증기발생기 만수위 대처방안	36
제 7 장 결론	38
참고문헌	39

표 목 차

표 2.1 WH1000형 원전 증기발생기 설계사양	4
표 2.2 OPR1000형 원전 증기발생기 설계사양	13
표 3.1 WH1000형 원전 보조급수펌프 사양	18
표 3.2 OPR1000형 원전 보조급수펌프 사양	20
표 5.1 WH1000형 원전과 OPR1000형 원전의 증기발생기 제원상의 차이점	26
표 5.2 WH1000형 원전과 OPR1000형 원전의 보조급수펌프 비교	27
표 5.3 WH1000형 원전과 OPR1000형 원전의 보조급수제어 비교	27
표 5.4 WH1000형 원전과 OPR1000형 원전의 보조급수 동작신호 비교	28

그 립 목 차

그림 2.1	WH1000형 원전 증기발생기구조	5
그림 2.2	WH1000형 원전 주급수 제어	5
그림 2.3	WH1000형 원전 주급수 우회제어	6
그림 2.4	WH1000형 원전 급수 제어	7
그림 2.5	WH1000형 원전 주급수펌프 속도제어	8
그림 2.6	WH1000형 원전 주급수펌프 속도제어 프로그램	8
그림 2.7	WH1000형 원전 주급수펌프 속도제어 개략도	9
그림 2.8	OPR1000형 원전 증기발생기 구조	12
그림 2.9	OPR1000형 원전 다운콤마(Downcomer) 밸브제어 프로그램	14
그림 2.10	OPR1000형 원전 주급수펌프 속도제어 프로그램	15
그림 2.11	OPR1000형 원전 고수위 우선(HLO) 신호발생 회로	16
그림 2.12	OPR1000형 원전 수위채널 편차 경보 신호발생 회로	16
그림 2.13	OPR1000형 원전 고수위 채널 선택 신호발생 회로	17
그림 2.14	OPR1000형 원전 고/저 수위 경보 신호발생 회로	17
그림 2.15	OPR1000형 원전 원자로출력 보상 신호발생 회로	17
그림 3.1	WH1000형 원전 보조급수계통 개략도	19
그림 3.2	OPR1000형 원전 보조급수계통 개략도	21
그림 6.1	원자로냉각재펌프 정지 후 원자로냉각재 온도 곡선	31
그림 6.2	원자로출력 100 %에서 모든 교류전원상실(SBO)시 증기발생기 수위 곡선	32
그림 6.3	원자로출력 2 %에서 모든 교류전원상실(SBO)시 증기발생기 수위 곡선	33
그림 6.4	원자로출력 100 %에서 증기발생기 관과열시 증기발생기 수위 곡선	34
그림 6.5	원자로출력 2 %에서 증기발생기 관과열시 증기발생기 수위 곡선	35
그림 6.6	증기발생기 수위전송기 신설을 반영한 보조급수계통 개략도	37

ABSTRACT

A study on the effectiveness of Auxiliary feedwater system in WH1000 type NPP

Lee, Kyoung Woo

Adviser : Prof. Lee Kung Jin

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

Nuclear power plant is a facility which produces electricity by heat from reactor, steam generator and turbine. The steam generator uses a high-pressure water system to produce steam from the reactor coolant system to operate the turbines, and forms the boundary between the reactor coolant system and the secondary system.

The high temperature of the high pressure reactor flows into the lower head of the steam generator and flows through the inside of U-tube, heating the water on the outside of the secondary water.

The auxiliary feedwater system removes heat from the reactor core by supplying feedwater to prevent core damage when feedwater system is inoperable. For this reason, the auxiliary feedwater system contributes to the safety of the reactor and ESF (Engineered Safety Facility). The function of the auxiliary feedwater system is as follows.

First, supplying feedwater to steam generator during abnormal accident

Second, supplying feedwater during the feedwater system inoperable due to the loss of offsite power.

Third, supplying feedwater during the maintaining hot stand-by condition.

Fourth, supplying feedwater to steam generator in a condition required hot shutdown condition.

Compared to the OPR1000 type plants, the WH1000 type plants have relatively small steam generators volume and tube number. Therefore, the falling rate of T_{avg} in the WH1000 type plants are faster and the fluctuation of steam generator level is variable. This means that the steam generation of the WH1000 type plants relatively reach to full range level faster than the OPR1000 type plants.

When it happens to the auxiliary feedwater activation signal, the auxiliary feedwater flow control valves are fully opened and the rate of flow is maximum. Steam generator level can be maintained from 7 to 50 % by operator's controlling.

However, the steam flow rate of the steam generator by level of steam generator in the OPR1000 type can be maintained automatically to 50% level without the intervention of operator. Overall, whether the steam generator level is full or not is dependent on operator's level control capability

The negative effects of the steam generator full level are as follows.

First, if water flows into a steam pipe, vapor condenses and the water hammer phenomenon can be triggered. This causes damage to piping hangers, supports structures, valves, and operators, and loses the integrity of the steam pipe.

Second, when significant amount of water is poured into the steam pipe, the design criteria for the spring support structure of steam pipe is exceeded stress limitation by the extra loads. it causes severe deformation of steam pipe.

Third, valves are likely to be opened and not to reopened in a steam generator full level condition because they are not designed to fit into this environment.

Fourth, if the water flows into the turbine driven auxiliary feedwater pump through the steam pipe the turbine of auxiliary feedwater pump may not be seriously damaged, causing the pressure boundary to be compromised.

Fifth, the acceleration of a liquid that is deposited inside a pipe can cause breakage of piping or equipment.

This study is to verify the problems of the WH1000 type's facility and improvement plan about T_{avg} falling, plan of prevention of steam generator full level based on tests and analysis by simulator's test.

제 1 장 서 론

원자력발전소는 원자로에서 나오는 열을 증기발생기를 통해 증기를 생산하고 이를 이용하여 터빈을 회전시켜 전력을 생산하는 설비이다. 증기발생기는 원자로냉각재계통으로부터 터빈-발전기를 구동하기 위한 포화증기를 생산하기 위해 고온 고압의 물을 사용하며, 원자로냉각재계통과 2차 계통 사이의 경계부가 된다. 고온 고압의 원자로냉각재는 증기발생기의 하부 헤드로 유입되어 U-관 내부를 통해 흐르며 이때 U-관 외부에 있는 2차측의 물을 가열한다. 증기발생기를 떠난 물은 원자로냉각재 펌프에 의해 원자로 내로 되돌아 와서 재 가열 된다.

보조급수계통은 주급수계통이 운전 불가능할 때 증기발생기에 급수를 공급하여 노심 손상을 방지하기 위해 원자로 노심으로부터 열을 제거한다. 이러한 이유 때문에 보조급수계통은 원자로 안전기능 및 공학적 안전설비로서 기여한다. 보조급수계통의 기능은 다음과 같다.

- 첫째, 주급수계통의 비정상적인 사고 발생시 증기발생기에 급수 공급
- 둘째, 소외전원상실 등으로 주급수계통 운전 불능 시 급수공급
- 셋째, 장시간 발전소를 고온대기 상태로 유지 시 급수공급
- 넷째, 1차 계통을 고온정지 상태로 냉각이 요구될 시 증기발생기에 급수 공급

증기발생기측면에서 WH1000형 원전은 OPR1000형 원전에 비해 증기발생기 1대당 용량은 작고, 전열관수도 적다. 이로 인해 RCP 1대 정지시 T_{avg} 감소가 빠르며, 증기발생기 수위변동이 상대적으로 심하여 증기발생기 수위조절도 어렵다. 다시 말하면 발전소 비정상상황 발생시 WH1000형 원전이 OPR1000형 원전에 비해 증기발생기 만수위 도달시간이 상대적으로 빠르다는 것을 의미하고 있다.

보조급수 유량조절측면에서 보면 WH1000형 원전은 비상보조급수신호가 발생한 후 보조급수 유량조절밸브가 완전 열림으로 인해 보조급수유량이 최대로 공급된다. 이후 증기발생기 만수위 방지를 위해 수동으로 운전원이 보조급수유량을 조절해 주어야만 증기발생기 협역수위를 7 ~ 50%로 유지시킬 수 있다. 그러나 OPR1000형 원전은 일

단 비상보조급수 신호가 발생되면 보조급수 유량조절밸브가 증기발생기 수위신호를 받기 때문에 운전원의 개입없이 자동으로 증기발생기 수위를 50% 로 유지할 수 있다. 위 사항을 종합해 보면 WH1000형 원전에서 비상상황 발생시 증기발생기 만수위 방지여부는 운전원의 증기발생기 수위조절여부에 달려있다.

증기발생기 만수위를 방지해야 하는 이유에 대해 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 물이 증기관으로 유입되면 증기가 응축되고 응축에 의한 수격현상이 발생할 수 있다. 이는 배관 행거, 지지구조물, 밸브, 운전원 등에 손상을 입히고 증기관의 건전성을 상실시킨다.

둘째, 상당한 양의 과냉각 상태의 물이 증기관으로 들어가면 물의 추가 하중에 의해 증기관 스프링지지 구조물의 설계기준 응력한계가 초과되어 증기관이 심하게 변형될 수 있다.

셋째, 증기발생기 과충수시에는 이상류 또는 물을 배출하기 위해 이 밸브들이 사용될 수 있는데, 이러한 환경에 맞도록 설계되지 않았기 때문에 열렸다가 다시 닫히지 않을 가능성이 있다.

넷째, 증기관으로 물이 유입된 후 터빈구동 보조급수펌프를 유입될 경우 터빈이 심각하게 손상되어 구동할 수 없게 되어 이로 인해 압력경계가 위협받을 수 있다.

다섯째, 배관 내부에 축적된 액체의 가속현상이 배관이나 설비의 파손을 일으킬 수 있다.

이러한 발전소 비상상황 발생시 WH1000형 원전의 설비의 취약성을 파악하고 모의 제어반 실험을 통한 보조급수 공급의 유효성을 검증을 통해 원자로냉각재펌프 한 대 정지시 Tavg 감소에 대한 개선방안과 증기발생기 만수위 방지 방안을 마련하여 발전소 안전운영에 기여하고자 한다.

제 2 장 WH1000형 및 OPR1000형 원전의 증기발생기 비교

제 1 절 WH1000형 원전 증기발생기

1. 일반사항

원자로용기의 노심을 통과한 원자로냉각재는 원자로냉각재 계통의 출구관을 통해 증기발생기의 하부헤드에 있는 입구노즐로 들어간다. 다시 냉각재는 U-관들을 통해 흘러가면서 급수에게 열을 전달하고 증기발생기의 하부헤드에 있는 또 다른 출구노즐을 통해 원자로냉각재 펌프로 흡입된다. 이 펌프는 냉각재를 다시 원자로로 되돌려 보내어 재 가열된다. 급수는 증기발생기 상부의 내부에 설치되어 있는 급수 분산환과 J-튜브를 통해 증기발생기 상부 셀 수면 아래로 유입된다. 이렇게 유입된 급수는 하향 통로를 통해 내려오면서 관다발 외피관 으로부터 약간의 열을 전달받는다. 급수는 12" 떨어져 있는 관다발 외피관과 관관 사이의 공간을 통해 방사형으로 관다발내로 유입된다. 급수는 관다발을 지나면서 상부로 흘러가는데 이때 관내부에 있는 원자로냉각재로부터 열을 받아 습증기로 증발된다. 1차측 으로부터 2차측 급수로의 직접적인 열전달은 상승유로 지역에서 일어난다. 1차측 으로부터 전달된 열은 2차측 급수를 포화온도까지 가열시켜 끓도록 한다. 2차측 급수가 끓게 되면 상승유로 지역 맨 윗부분의 유체는 물-증기가 혼합된 습증기 상태가 된다. 이렇게 발생된 습증기는 16개의 제1단(와류날개식) 습분분리기들을 통과하면서 약간의 습분이 제거되고 제거된 물은 관외부 지역의 관다발 외피관 상부 바깥에 있는 급수공간으로 유입된다. 제1단 습분분리기를 통과한 습증기는 제2단(세브론식, 방향전환식) 습분분리기로 다시 한번 유입되어 나머지 습분이 제거되어 급수와 혼합된다. 이렇게 2단계의 습분분리기를 지난 건조된 포화증기는 증기유량 제한기를 통해 주증기 계통으로 공급된다.

2. 설계사양

표 2.1 WH000형 원전 증기발생기 설계사양

변 수		값
공 통	증기발생기 수	3
	열전달율 (0.2% 취출시 증기 발생기별)	928.2×10^6 kcal/hr ($3,168 \times 10^6$ Btu/hr)
1차측	설계압력 / 온도	174.7 kg/cm ² A / 343.3 °C (2,485psia / 650 °F)
	냉각재 입구온도	326.6 °C (619.9 °F)
	냉각재 출구온도	291.5 °C (556.7 °F)
	냉각재 유량	16.5×10^6 kg/hr (36.4×10^6 lb/hr)
	냉각재 체적	27.35 m ³ (966 ft ³)
	전열관 크기 (외경)	17.48 mm (0.688 inch)
	전열관 두께 (공칭)	1.02 mm (0.040 inch)
	전열관 수	5626개
2차측	설계압력 / 온도	83.3 kg/cm ² A / 316 °C (1,185 psia / 600 °F)
	증기압력 (증기노즐 끝에서)	66.7 kg/cm ² A (964 psia)
	증기유량 (0.25% 습분상태에서 증기발생기별)	1.8579×10^6 kg/hr (4.1×10^6 lb/hr)
	전출력에서 급수온도	226.7 °C (440 °F)
	증기노즐 수량 / 내경	7개 / 152 mm (6 inch)
	평균 열전달계수(설계치)	2784.6 kcal/hr · m ² · °C (570.3 Btu/hr · ft ² · °F)

3. 증기발생기 수위제어

가. 주급수 제어계통

주급수 제어계통의 기능은 출력이 2%로부터 100% 사이에서 증기발생기의 수위를 자동제어 하여 기준수위인 50%로 일정하게 유지시키는 것이다. 제어는 증기 유량, 급수 유량 및 증기발생기 수위편차 신호에 의해서 동작되는 3요소 제어기에 의해서 수행된다.

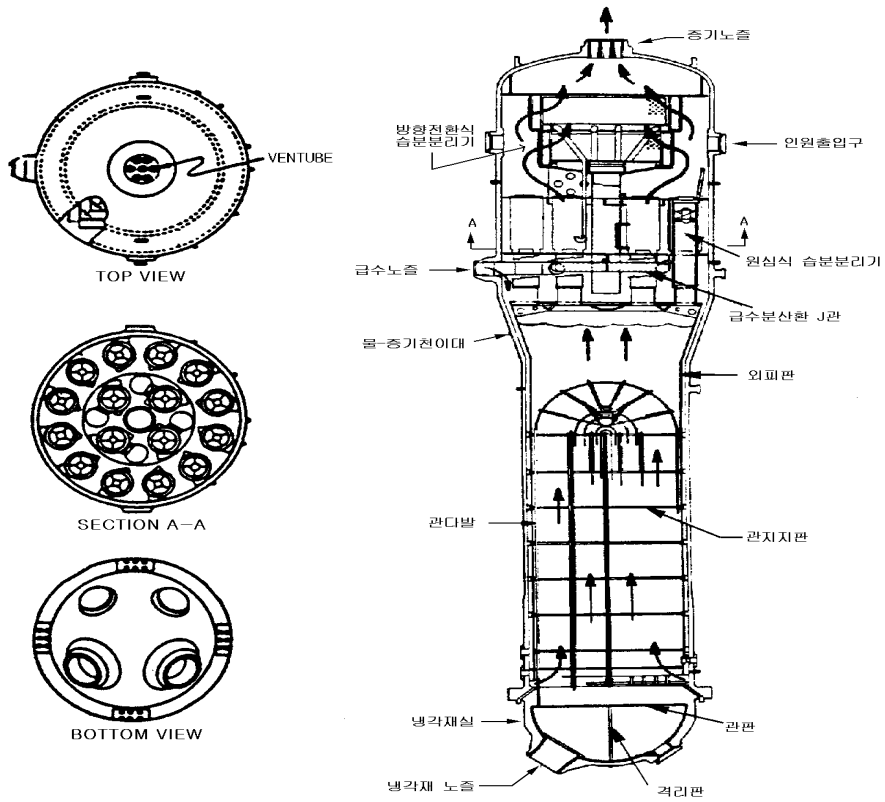


그림 2.1 WH1000형 원전 증기발생기구조

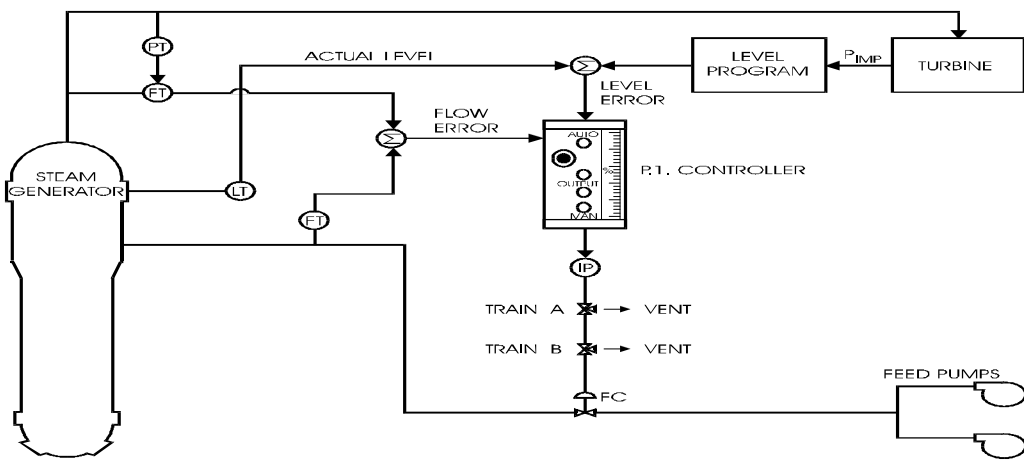


그림 2.2 WH1000형 원전 주급수 제어

증기 유량은 증기 압력 검출기에 의해서 밀도에 대한 보상이 이루어지면서 검출된다. 여기서 검출된 증기 유량 신호는 비교 증폭기에 입력되며, 이곳에서 급수 유량 신호와 비교되어 그 유량 편차 신호가 비례/적분 제어기에 입력된다.

수위 프로그램은 터빈 충동단 압력 전송기로부터 하나의 신호가 입력된다. 이 충동단 압력신호는 0과 50%에 의해서 곱해져서 출력에 관계없이 50%인 일정한 수위 프로그램을 제공하기 위해 수위 프로그램에 입력된다. 실제 증기발생기 수위는 수위신호에서 자연적인 요동 현상을 감쇠 제거하는 래그(Lag)회로를 통하여 보내진다. 비교기에서 실제 수위와 프로그램 수위가 비교된 편차신호가 비례/적분 제어기에 입력된다. 이 비례/적분 제어기는 수위 편차가 유량 편차보다 우세한 것을 허용하며 또한 정상 상태의 수위 및 유량 편차를 제거한다.

수위 및 유량 편차 신호들은 전체 편차 신호를 발생하기 위해 합해지며, 이 전체 편차 신호는 자동인 경우 비례/적분 제어기에서 나가게 된다. 제어기의 출력 신호는 운전원에 의해 수동으로 조절되며, 여기서 발생한 출력신호는 전류/공기압 변환기를 거쳐 주급수 제어밸브의 개도를 조정하게 된다.

나. 주급수 우회제어계통

주급수 우회제어계통은 출력 20%이하에서 자동 급수제어를 위해 사용하는 데 이것은 그림 2.3에 잘 나타나 있다.

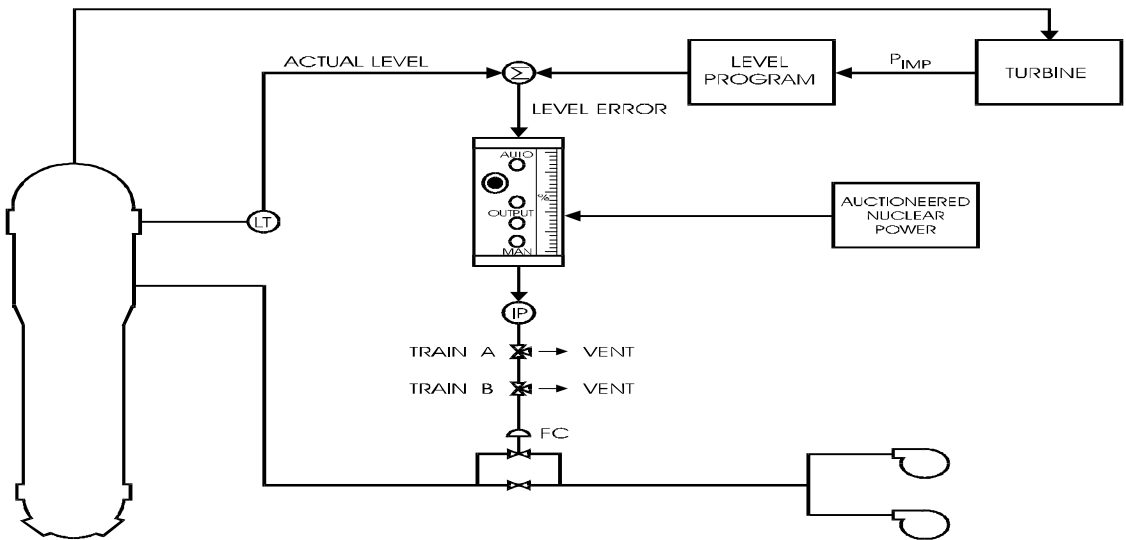


그림 2.3 WH1000형 원전 주급수 우회제어

그림 2.4에서와 같이 급수제어는 수위 프로그램과 수위 검출기를 주급수 제어계통과 같이 사용하고 있다. 저 출력에서는 유량신호들이 불안정해서 더 큰 과도현상을 일으키므로 유량 편차 신호 대신 가장 높은 원자로 출력을 사용한다.

주급수 제어계통에서와 같이 수위편차 신호는 정상상태 수위편차들을 제거하기 위하여 비례/적분 회로로 입력되며 이 신호는 원자로 출력신호와 합산되어 전체적인 편차 신호를 발생한다. 이 전체 편차 신호는 다시 전류/공기압 변환기를 통하여 우회 제어밸브의 개도를 조정하게 된다.

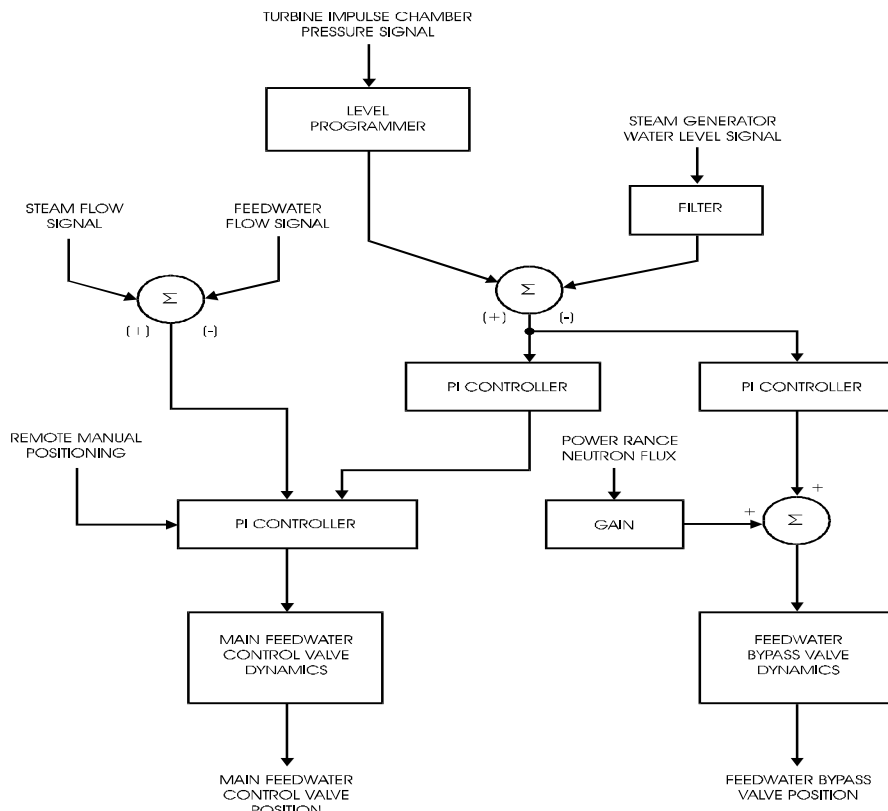


그림 2.4 WH1000형 원전 급수 제어

다. 주급수펌프 속도제어계통

그림 2.5에서 보는 바와 같이 주급수펌프 속도제어는 주증기 헤더 압력과 주급수 헤더 압력 차를 이용한다.

원심펌프의 방출압력은 펌프의 속도에 비례하기 때문에 펌프속도 조절에 의해서

방출압력을 조절할 수 있다. 급수펌프 속도제어계통은 증기헤더와 급수헤더 사이의 프로그램된 압력 차에 의해 제어된다. 이 프로그램된 차압력은 일정한 무부하 설정치에 가변 차압신호 첨가에 의해 발생된다.

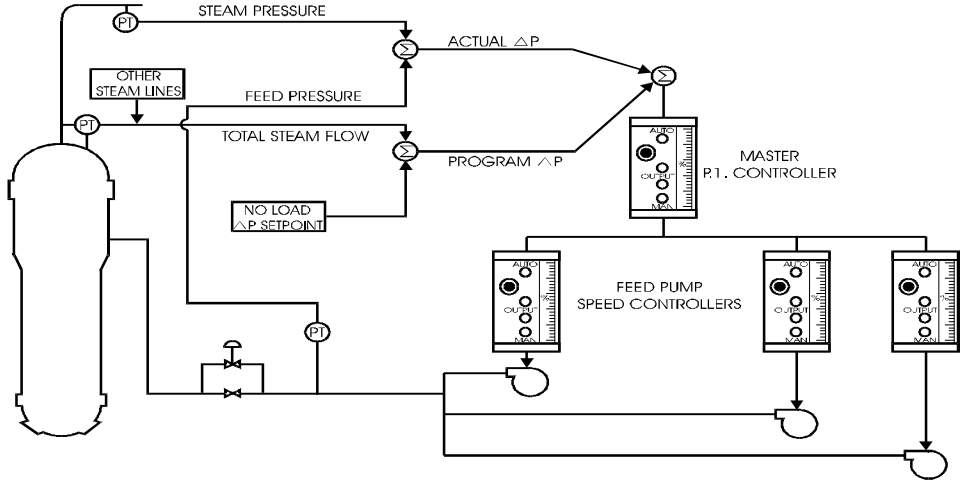


그림 2.5 WH1000형 원전 주급수펌프 속도제어

그림 2.6에서 보는 바와 같이 가변성의 차압 신호는 모든 증기발생기에서 나오는 전체 증기 유량으로부터 유도된다. 증기유량 신호들은 주급수 제어계통에서 사용한 것과 동일한 것이다. 전체의 증기 유량 신호는 차압 신호로 변환되고 이 차압 신호는 0% 출력에서 20% 출력에서 5.45kg/cm²로 일정하고, 출력 20%에서 선형적으로 증가하여 출력 100%에서는 14.68kg/cm² 값을 가지도록 프로그램 되어 있다.

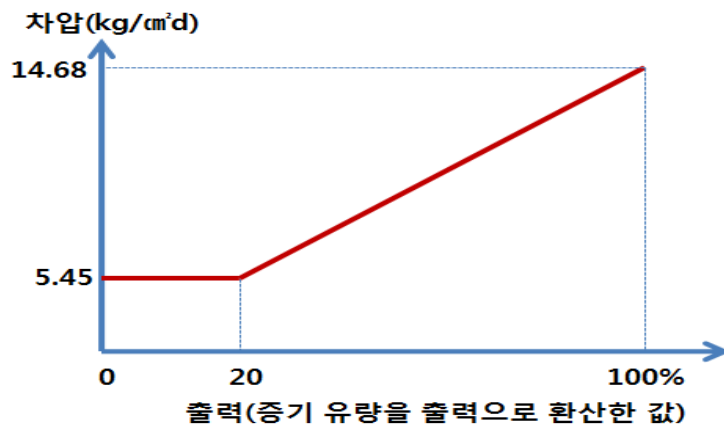


그림 2.6 WH1000형 원전 주급수펌프 속도제어 프로그램

이 차압 신호는 급속한 증기유량 변화에 대해 좀 더 느린 반응을 제어계통에 주기 위해 지연(Lag)회로를 거친다. 무부하 설정 차압과 출력에 따라 변하는 차압은 프로그램 차압을 발생하기 위해 더해진다.

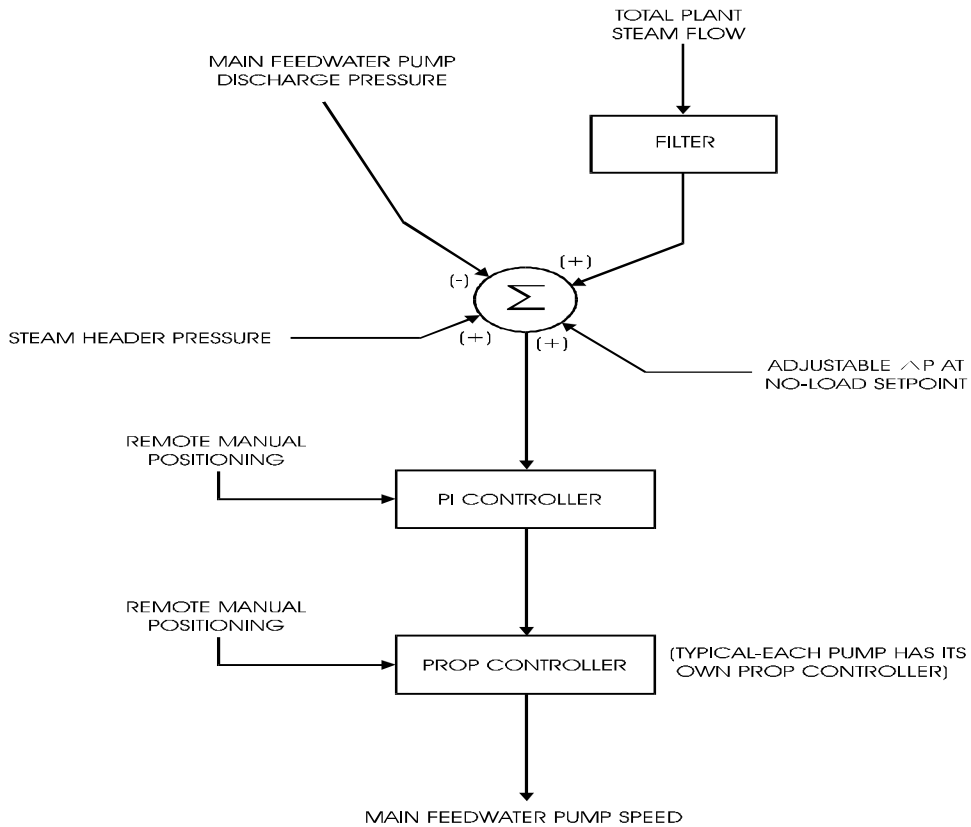


그림 2.7 WH1000형 원전 주급수펌프 속도제어 개략도

그림 2.7에서 보는 바와 같이 증기헤더 압력은 실제 차압신호를 발생하기 위해 급수헤더 압력과 비교된다. 이 실제 차압과 프로그램 차압은 합산기에 비교되어 차압 편차신호를 발생하여 마스터 비례/적분 제어기(또는 마스터 속도제어기)에 입력된다.

이 마스터 속도제어기는 정상 상태 편차를 제거하고 각 주급수펌프 속도제어기에 신호를 보낸다. 각 펌프 속도제어기는 각 펌프의 전기적 속도 가버너에 신호를 보내어 펌프 터빈에 공급되는 증기를 제어하도록 되어 있다. 마스터 속도제어기는 주 제어실에 설치되어 있으며, 운전원은 각 펌프 속도제어기와 함께 필요하면 수동으로 제어가 가능하다.

라. 보호설비

증기발생기 수위제어계통과 관련된 보호신호는 다음과 같다.

- 주증기관 저 압력에 의한 안전주입
- 주증기관 압력 고 감소율에 의한 주증기관 차단
- 증기발생기 저-저 수위에 의한 원자로 트립 및 보조급수계통 작동
- 증기발생기 고-고 수위에 의한 터빈 트립 및 급수 차단

증기발생기 저-저 수위에 의한 원자로 트립 신호는 어느 한 증기발생기에서 4개의 협역 수위 검출기 중 2개 이상이 17% 이하를 지시하게 되면 발생한다.

증기발생기 저-저 수위에 의한 원자로 트립 신호는 어느 한 증기발생기에서 4개의 협역 수위 검출기 중 2개 이상이 17% 이하를 지시하게 되면 발생한다. 이 트립 신호는 원자로 트립은 물론 모터구동 보조급수펌프를 자동 기동하게 되는데, 이 트립 기능은 원자로의 열 제거원이 상실되는 사고가 발생하였을 때 원자로를 보호하기 위한 것이다.

증기발생기 고-고 수위(P-14)에 의한 터빈 트립 신호는 어느 한 증기발생기에서 3개의 협역 수위 검출기 중 2개가 78% 이상을 지시하게 되면 발생한다. 증기발생기 고-고 수위는 터빈 트립은 물론 주급수펌프 정지 및 주급수 차단이 발생한다. 이 트립 기능은 터빈 및 증기계통에서 과잉 습분에 의한 기기 손상 발생을 방지하는 것이다.

증기발생기 자동 수위제어계통에 대한 우선신호(Override Signal)는 다음과 같다.

- 증기발생기 고-고 수위
- 안전 주입
- 원자로 트립(P-4)과 원자로 냉각재 저 평균온도

수동제어는 증기발생기 자동 수위제어계통이 운전 불가능할 때 운전원이 수동으로 제어할 수 있기 때문에 자동 신호를 우선하도록 되어있다. 다른 3개의 신호는 주급수 차단의 원인이 된다. 하나의 급수차단 신호는 모든 증기발생기에 공급되는 주급수 공급관을 차단하게 된다. 이 차단은 급수 차단 밸브에 트립 신호를 보내어 주급수 제어밸브와 우회급수 제어밸브의 공기 공급관에 있는 솔레노이드의 전원을 차단시켜서 결국 모든 급수 밸브들이 닫히게 하여 수행된다.

증기발생기 고-고 수위로 주급수를 차단시키는 이유는 이미 과잉 수위에 있는 증기발생기에 급수되는 것을 급속히 차단하기 위함이다. 안전 주입에 의한 주급수 차단신호는 안전분석 결과 어떤 사고 발생 시 증기발생기로의 급수를 차단하면 사고의 중대성이 감소하는 것을 보여주기 때문이다.

원자로 트립과 원자로 냉각재 저-평균온도의 동시만족에 의한 주급수 차단은 원자로 트립 후에 노심이 과잉 냉각되는 것을 방지하기 위함이다.

제 2 절 OPR1000형 원전 증기발생기

1. 일반사항

그림 2.8와 같이 증기발생기는 예열기(Economizer)를 보유하고 있는 수직 재순환 U-튜브 구조물로서 예열기 영역과 증발기 영역으로 구분된다. 증기발생기의 수직 분리판(Divider Plate)이 증기발생기 1차측 헤드에 설치되어 입구/출구 수실을 분리하고 있어 원자로 냉각재는 원자로용기 고온관 으로부터 증기발생기 1차측 헤드에 설치된 입구 노즐로 유입되어 U-튜브를 통과하면서 2차측 급수에 열전달을 한 후 2개의 출구 노즐을 거쳐 원자로냉각재 펌프에 의해 원자로 용기로 보내진다.

2차측 급수는 증기발생기 상부로 공급되는 하향유로와 하부로 유입되는 예열 급수로 구분된다. 상부로 공급되는 하향유로는 하향통로를 통하여 U-튜브 외측으로 흘러 1차측 예열 영역에서 예열 급수와 혼합되어 포화상태로 비등하면서 습분을 동반한 상태로 되었다가 습분분리기를 통과하면서 99.75 % 이상의 건포화증기로 변환되어 터빈에 공급된다. 일체형 급수예열기가 장착된 증기발생기는 많은 부분에서 이전의 전열관 재순환 증기발생기와 유사하다. 근본적인 차이점은 급수를 하향유로 채널(Downcomer Channel)내의 재순환수류와 혼합시키기 위해 단순히 분사기(Sparger)를 통하게 하는 것 대신에 급수의 일부를 증기발생기 내의 별도의 부분으로 보낸다는 것이다. 전열관의 저온관 및 고온관 전열관 다발로 구성된 만원통형 부분이 수직 분리판(Divider Plate)으로 전열관 다발의 나머지 부분과 나뉘어 있다. 급수는 직접 이 부위로 들어가서 증발기 부위로 방출되기 전에 예열된다. 증발기의 하부에서 하향유로 채널부위는 증기발생기 단면 중 한쪽 절반을 차지한다. 이러한 비대칭성의 영향은 재순환 비율 및 내부유량 계산시와 전열관 지지구조물 설계시에

고려된다.

수직으로 세워져 있는 전열관의 열전달면에서 생성된 증기-습기 혼합물은 습분분리기의 원심운동에 의하여 증기와 수분입자로 분리된다. 수분은 습분분리기 몸체의 미세 구멍을 통해 빠져 나와 하향유로 채널을 통해 순환을 계속하게 된다. 증기는 주름잡힌 판형의 건조기를 통과함으로써 최종 건조가 된다.

증기발생기 급수노즐에서 증기 출구 노즐간 압력강하는 이코노마이저를 포함하여 약 $2.81 \text{ kg/cm}^2(40 \text{ psi})$ 이다.

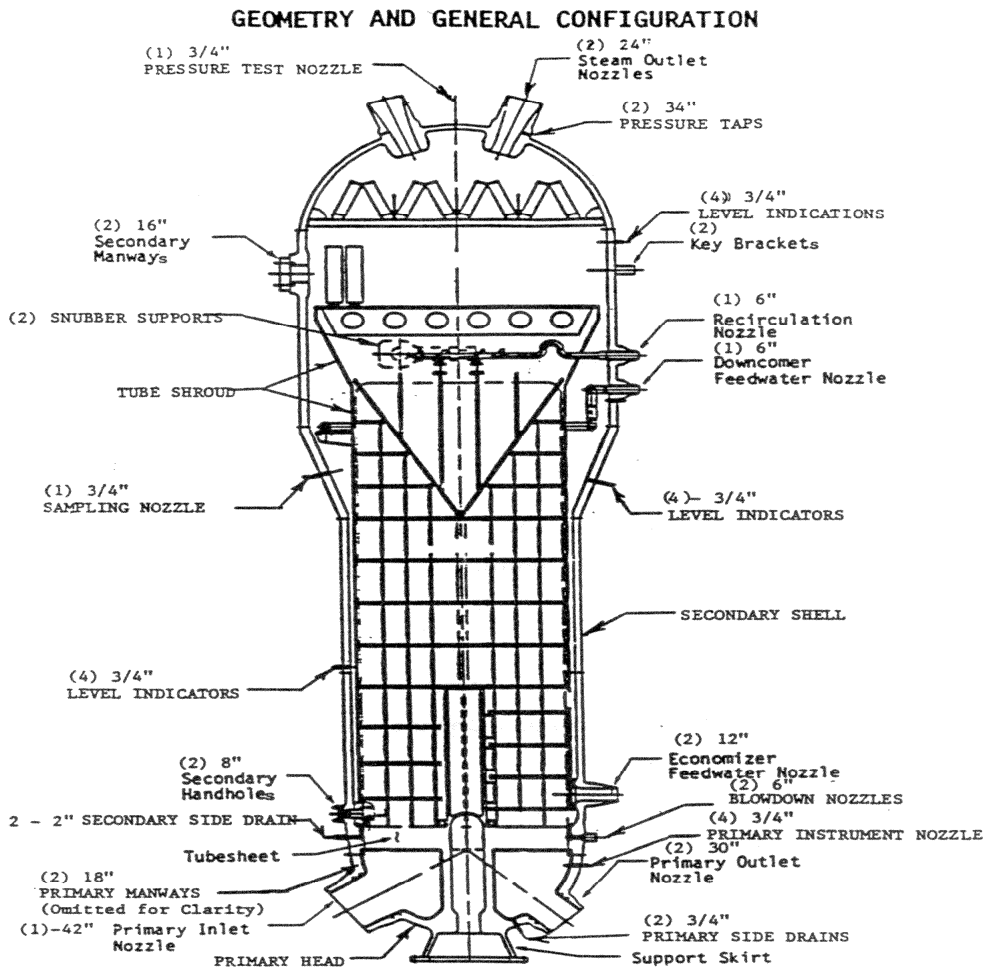


그림 2.8 OPR1000형 원전 증기발생기 구조

2. 설계사양

표2.2 OPR1000형 원전 증기발생기 설계사양

변 수		값
공 통	증기발생기 수	2
	열전달율 (0.2% 취출시 증기 발생기별)	$1,215.6 \times 10^6$ kcal/hr ($4,824 \times 10^6$ Btu/hr)
1차측	설계압력 / 온도	175.8 kg/cm ² A / 343.3 °C (2,500 psia / 650 °F)
	냉각재 입구온도	327.3 °C (621.2 °F)
	냉각재 출구온도	295.8 °C (564.5 °F)
	냉각재 유량	27.56×10^6 kg/hr (60.75×10^6 lb/hr)
	냉각재 체적	51.9 m ³ (1,834 ft ³)
	전열관 크기 (외경)	19.1 mm (0.75 inch)
	전열관 두께 (공칭)	1.07 mm (0.042 inch)
	전열관 수	8,214 개
2차측	설계압력 / 온도	89.3 kg/cm ² A / 301.7 °C (1,270 psia / 575 °F)
	증기압력 (증기노즐 끝에서)	75.2 kg/cm ² A (1,070 psia)
	증기유량 (0.25% 습분상태에서 증기발생기별)	1.442×10^6 kg/hr (3.18×10^6 lb/hr)
	전출력에서 급수온도	232.2 °C (450 °F)
	증기노즐 수량 / 내경	2개 / 612.775 mm (24.125 inch)
	평균 열전달계수(설계치)	$2,941$ kcal/hr · m ² · °C (602.25 Btu/hr · ft ² · °F)

3. 증기발생기 수위 제어

가. 주급수 제어계통

원자로 저출력(20% 이하)상태에서 주급수 제어계통(FWCS)은 유량 요구신호(Flow Demand Signal)를 발생시키기 위하여 증기발생기 수위에 동적보상을 수행하며 유량 요구신호는 증기발생기 다운콤마 밸브 프로그램으로 보내져 요구되는 급수유량에 해당하는 다운콤마 밸브 요구신호를 발생시킨다.

프로그램된 신호 또는 수동 제어신호는 자동/수동 제어기에 보내지며 이 신호는 다운콤마 밸브 개도를 제어한다. 원자로 저출력 제어모드에서는 이코노마이저 밸브는 닫혀 있고 주급수펌프 속도 설정치는 최저값을 유지한다.

원자로 고출력(20% 이상)에서는 증기발생기 다운콤마밸브는 바이어스(BIAS) 신호를 받는다. 이 신호는 정격 급수유량의 10%가 공급 가능하도록 다운콤마 밸브를 개방한다. 증기발생기 이코노마이저 밸브는 나머지 급수유량을 조절한다. 증기발생기 수위신호는 증기 유량신호와 급수 유량신호 사이의 편차에 의해서 보상된다.

보상된 신호는 수위 설정치(LSP) 신호를 비교하며 그 편차신호는 비례적분기(PI)로 보내진다. 비례적분기(PI)를 통과한 급수유량 요구 신호는 주 자동/수동 제어 스테이션에 보내진다. 주 자동/수동 제어 스테이션에서는 운전원이 필요시 수동제어를 선택할 수 있다. 주 제어 스테이션 출력신호는 증기발생기 다운콤마와 급수예열기 밸브제어 프로그램에 보내진다. 이 신호는 2개의 자동/수동 제어 스테이션을 통과하고 운전원에게 증기발생기 다운콤마와 급수예열기 밸브에 개별적으로 수동 제어 수단을 제공한다. 주 자동/수동 제어 스테이션의 출력신호는 높은 신호 선택회로로 보내지며 높은 신호 선택회로는 2개의 주급수 제어시스템의 출력신호인 급수 요구 신호 중에서 높은 신호를 선택하여 주급수펌프 제어 프로그램으로 보내진다. 이 제어프로그램은 펌프 속도 설정치 신호를 발생시키며 주급수펌프의 개별 자동/수동 제어 스테이션으로 보내진다. 운전원은 필요시 이 제어 스테이션에서 수동으로 주급수펌프를 제어할 수 있다.

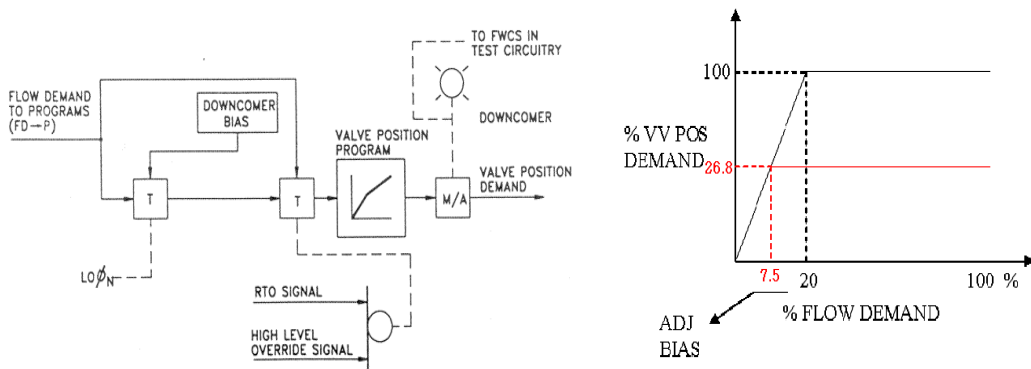


그림 2.9 OPR1000형 원전 다운콤마(Downcomer) 밸브제어 프로그램

나. 주급수펌프 속도제어 프로그램

주급수펌프가 저유량 운전중에는 주급수펌프 속도제어 프로그램은 미리 설정된 최저 속도신호를 발생시킨다. 각각의 주급수 제어시스템에 있는 높은 신호 선택회로는 주급수펌프 속도설정치를 발생하기 위하여 각각의 주 제어 스테이션으로부터 오는 2개의 유량 요구신호 중에서 큰 신호를 선택한다. 만일 원자로 정지 우선 신호가 발생되었거나 주급수 제어시스템이 시험 중일 때는 주급수 제어시스템으로부터 0의 유량 요구 신호가 높은 신호 선택회로에 전달된다. 그리고 다른 주급수 제어시스템으로부터 발생하는 유량 요구신호는 주급수펌프 속도설정치 신호를 발생시키는

데 사용된다. 주급수펌프 속도설정치의 요구신호는 주급수펌프 속도 제어 프로그램에서 발생된다. 이 신호는 수동/자동 제어 스테이션에 의해서 주급수펌프 속도제어 계통으로 전달된다. 주급수펌프 속도설정치 요구신호는 필요시 수동/자동 제어 스테이션에서 운전원에 의해서 수동으로 발생될 수 있다.

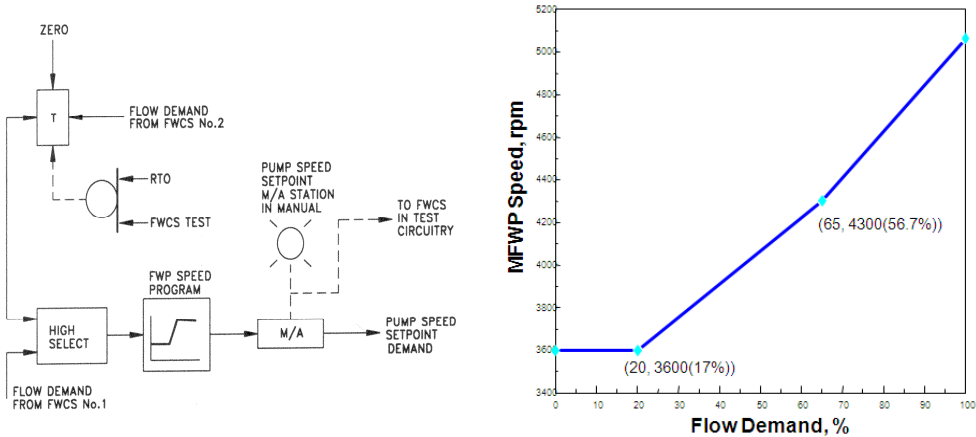


그림 2.10 OPR1000형 원전 주급수펌프 속도제어 프로그램

다. 하드웨어 관련 신호

(1) 고수위 우선 신호

고수위 우선 신호는 증기발생기 수위가 높을 때 급수 요구 신호를 차단하고 그 신호를 '0' 이 되게 만든다. 이후 증기발생기에 급수유량 감소 및 터빈에 습분동반 방지를 위해 다운콤마 수위를 감소시킨다. 그림 2.11과 같이 수위 채널 1의 HIGH와 수위 채널 2 HIGH의 2개 신호는 수위 채널 1(L1) 또는 수위 채널 2(L2)가 프로그램 설정치 이상 증가하면 발생된다. L1 또는 L2가 선택시 고수위 선택 신호(HLO)는 선택된 채널에만 의존한다. 채널 선택스위치가 BOTH 위치에 선택시 고수위 선택신호를 발생하기 위한 2개의 채널에 고수위 신호가 필요하다.

고수위 우선 신호는 증기발생기 수위가 고수위 우선 신호 설정치 이하로 감소되면 자동으로 해제된다. 고수위 우선 신호 시험 누름버튼은 “주급수 제어계통 시험 중” 신호가 발생되었을 때 고수위 우선 신호를 발생시킬 수 있다.

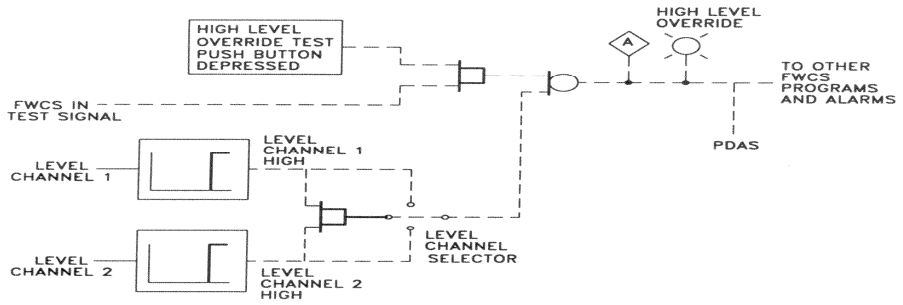


그림 2.11 OPR1000형 원전 고수위 우선(HLO) 신호발생 회로

(2) 수위채널 편차

수위채널 1과 수위채널 2사이 신호의 절대값이 설정치보다 클 경우에 수위 채널 편차 경보가 발생한다. 그림 2.12와 같이 이 회로의 기능을 주급수 제어 계통의 시험 중일 때 수위채널 편차 시험누름단추를 누름으로서 시험할 수 있다.

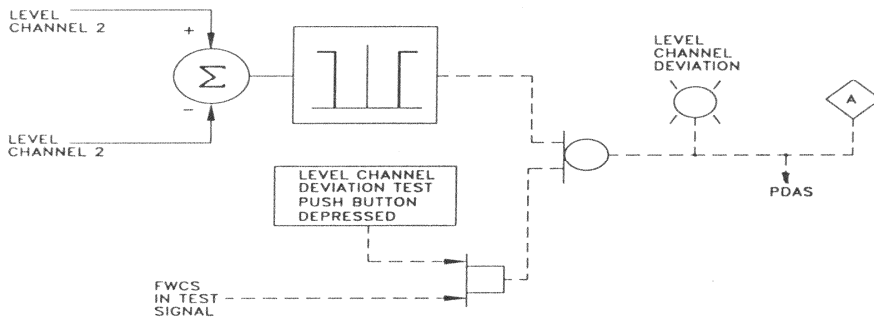


그림 2.12 OPR1000형 원전 수위채널 편차 경보 신호발생 회로

(3) 고수위 채널 선택

고수위 채널(HL) 회로는 2개의 수위채널 입력 중 큰 신호에 비례하는 출력을 발생시킨다. 높은 수위채널 신호는 원자로 정지우선(RTO)신호, 고/저 수위 경보신호, 주제어 스테이션에서 보상된 수위편차 신호를 결정하는 이용된다.

선택 스위치는 L1 혹은 L2 선택, 두 신호 중에서 높은 신호 선택을 가능케 만든다.

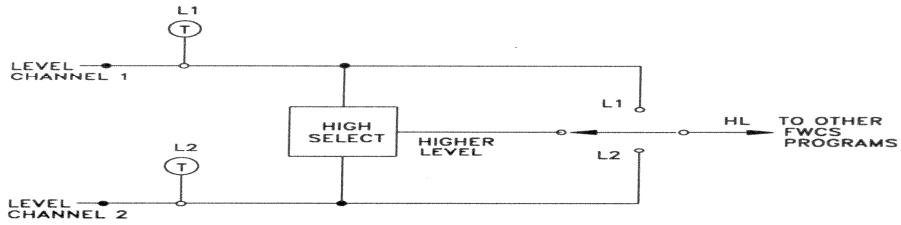


그림 2.13 OPR1000형 원전 고수위 채널 선택 신호발생 회로

(4) 고/저 수위 경보

고/저 수위 스위치는 수위채널 선택스위치로부터 선택된 높은 수위신호출력을 받는다. 그림 2.14와 같이 이 신호는 2개의 설정치(저수위, 고수위)와 비교된다. 수위신호가 고수위 설정치를 초과하거나 저수위 설정치 이하로 감소하면 출력은 경보상태가 된다.

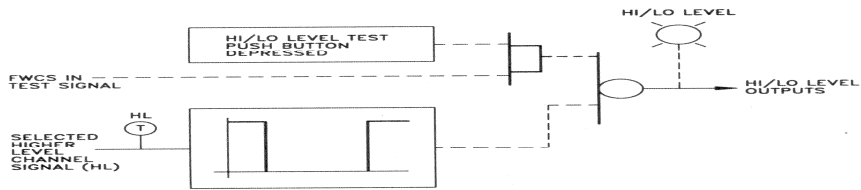


그림 2.14 OPR1000형 원전 고/저 수위 경보 신호발생 회로

(5) 원자로 출력신호

주급수 제어계통은 원자로 제어계통으로부터 2개의 원자로 출력신호(ψ_{N1} , ψ_{N2})를 받는다. 그림 2.15와 같이 ψ_N 입력 선택스위치 ψ_{N1} , ψ_{N2} 또는 두 신호의 평균값을 선택할 수 있게 한다. 선택된 신호는 지연기능 보상회로를 통과하며 보상된 원자로 출력신호(ψ_N)로 표시된다.

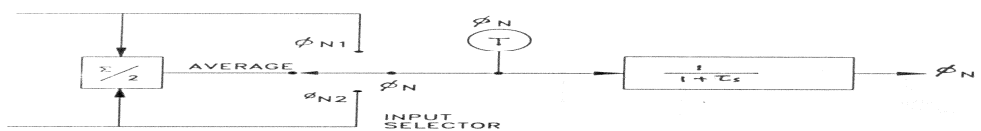


그림 2.15 OPR1000형 원전 원자로출력 보상 신호발생 회로

제 3 장 WH1000형 및 OPR1000형 원전의 보조급수계통 비교

보조급수계통은 주급수계통이 운전 불가능할 때 증기발생기에 급수를 공급하여 노심 손상을 방지하기 위해 원자로 노심으로부터 열을 제거하며 원자로 안전기능 및 공학적 안전설비로서 기여한다. 이 계통의 기능은 아래와 같다.

- 주급수계통의 비정상적인 사고 발생시 증기발생기에 급수 공급
- 소외전원상실 등으로 주급수계통 운전 불능 시 급수공급
- 장시간 발전소를 고온대기 상태로 유지 시 급수공급
- 1차 계통을 고온정지 상태로 냉각이 요구될 시 증기발생기에 급수 공급

제 1 절 WH1000형 원전 보조급수계통

1. 보조급수펌프 사양

표 3.1 WH1000형 원전 보조급수 펌프 사양

구 분	전동기 구동	터빈 구동
갯 수	2	1
형 태	수평, 원심형	수평, 원심형
속 도 (rpm)	3,560	3,550
최소 재순환율 (gpm)	100	145
실 양정 (ft)	3,450 ft	3550 ft
정격용량 (대당)	550 gpm (2.08 m ³ /min)	

2. 계통운전

정상 출력운전 중 보조급수계통은 운전되지 않지만 언제든지 운전될 수 있도록 대기상태로 있게 된다. 이 대기상태의 배열은 보조급수펌프와 복수저장탱크 사이에 있는 모든 밸브가 열려 있으며 또한 보조급수 펌프에서 증기발생기 사이에 있는 밸브 중 유량 제어밸브를 제외하고는 모든 밸브들이 열려 있는 상태이다.

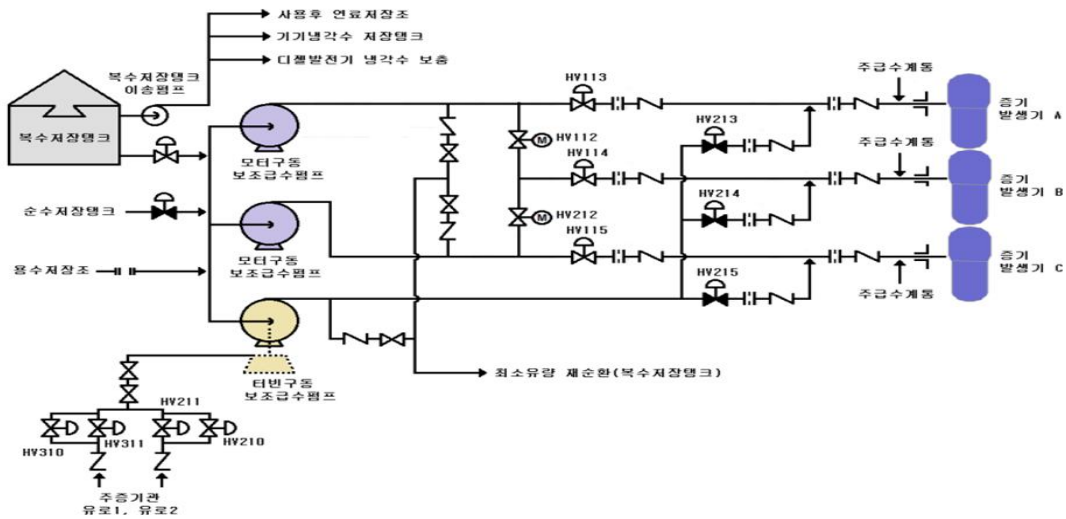


그림 3.1 WH1000형 원전 보조급수계통 개략도

보조급수계통의 수동 운전시 보조급수펌프를 기동하고 유량 조절기를 통해 각 유량조절밸브를 조절하여 증기발생기의 수위를 조절한다. 이와 같은 모든 조작은 주 제어실 및 보조정지 제어반에서 할 수 있도록 되어 있다. 자동 운전시는 아래와 같은 자동기동신호에 따라 모터구동 및 터빈구동 펌프가 자동 기동되며 이 때 각 펌프의 출구 압력과 유량 및 방출유량 조절 밸브가 열렸는가 확인한다.

- 모터구동 보조급수펌프의 자동 기동신호
 - 모든 주급수펌프 정지
 - 증기발생기 한대 저-저 수위(2/4계열, 17 %)
 - 안전주입신호
 - 4.16 kV 모선 저전압 및 디젤발전기 차단기 투입
 - 원자로정지불능 완화계통 동작¹⁾

- 터빈구동 보조급수펌프의 자동 기동신호
 - 증기발생기 2/3 대 저-저수위 (2/4계열, 17 %)
 - 4.16 kV 모선 저전압 및 디젤발전기 차단기 투입
 - 원자로정지불능 완화계통 동작

1) 원자로정지불능 완화신호 : 터빈출력 40 %이상에서 증기발생기 2/3대 수위가 13 % 이하시 발생

증기발생기 수위가 정상(50 %)으로 회복되면 보조급수 동작신호를 리셋하고 유량 조절기를 조작하여 증기발생기 수위를 정상으로 유지한다. 보조급수계통은 정상운전 중에도 사용할 수 있다. 즉 정상운전 중 기동, 냉각시에는 주로 기동용 급수펌프가 사용되며 보조급수펌프에 의해서도 가능하다. 펌프를 기동하는데 보조급수 동작신호를 사용하지 않고 주제어실에서 모터 제어 밸브 스위치를 조작하거나 또는 터빈구동 보조급수펌프의 경우는 터빈에 공급되는 증기밸브를 조작하여 구동할 수 있다. 이때 증기발생기로 공급되는 급수량은 유량조절 밸브를 조절하여 얻을 수 있으며 모든 보조급수 펌프가 운전될 때 최대 유량은 정격출력에서 주급수 유량의 약 8 % 정도이다.

제2절 OPR1000형 원전 보조급수계통

1. 보조급수펌프 사양

표 3.2 OPR1000형 원전 보조급수계통 사양

구 분	전동기 구동	터빈 구동
갯 수	2	2
형 태	수평, 원심형	터 빈
속 도 (rpm)	3,579	7,870
최소 재순환율 (gpm)	52.8	120
실 양정 (ft)	3,600 ft (1,098 m)	
정격용량 (대당)	최소 토출량 제외한 550 gpm (2.08 m ³ /min)	

2. 계통운전

가. 정상 운전

보조급수계통은 정상 발전소 기동 및 정지 시 사용되지 않는다.

이 계통은 공학적 안전설비의 하나로서 보조급수계통 구동신호에 따라 증기발생기에 충분한 급수를 제공하여 원자로냉각재로부터 노심 잔열을 제거하는 기능을

수행한다.

보조급수계통 구동신호는 다음 중 어느 하나의 신호에 의해 발생된다.

- 증기발생기 저수위
- 수동 작동

보조급수 작동신호가 발생하면, 전동기구동 및 터빈구동 보조급수펌프가 관련 증기발생기로 배열되어 관련 배관을 통해 급수를 공급하기 시작하며 복수저장탱크로의 재순환수는 정상 개방상태인 배관을 통하여 재순환된다.

보조급수 조절밸브는 증기발생기 수위를 제어하기 위한 조절 운전모드로 되어 있다. 보조급수계통이 정상운전일 경우, 공급되어야 할 보조급수 유량은 증기발생기 압력이 1,270 psia(89.3 kg/cm²A)일 때 500 gpm(1.89 m³/min) 이상 이며, 최대 보조급수 유량은 증기발생기 압력이 1,270 psia(89.3 kg/cm²A)일 때 750 gpm(2.84 m³/min) 이하이다. 보조급수의 온도는 복수저장탱크에 저장된 복수의 온도에 따라 40~120 °F의 사이에서 유지된다.

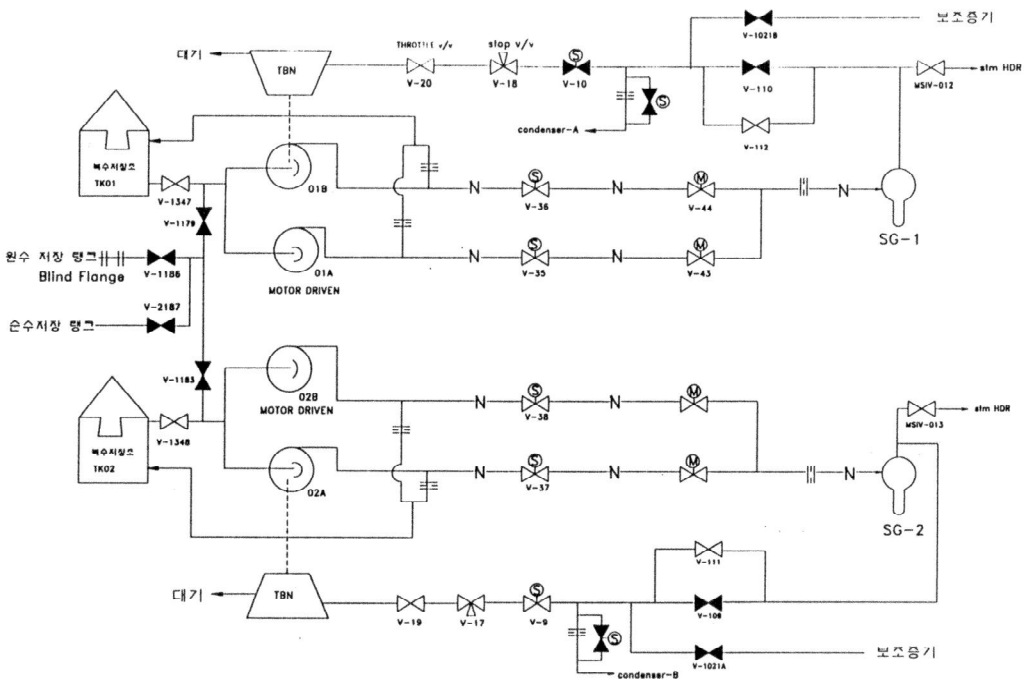


그림 3.2 OPR1000형 원전 보조급수계통 개략도

나. 기동 및 정지

보조급수계통은 보조급수 작동신호(AFAS)에 의해 자동적으로 기동된다.

보조급수 작동신호가 발생하면, 관련 증기발생기로 배열되어있는 전동기구동 및 터빈구동 보조급수펌프가 동시에 기동되고 증기발생기의 수위를 제어하는 보조급수 조절밸브는 자동적으로 조절모드로 된다. 모든 모터 구동 보조급수 격리밸브 및 보조급수 조절밸브는 정상적으로 개방된다. 보조급수계통은 보조급수 작동신호를 받으면 45초 이내에 관련 증기발생기에 최소유량(500 gpm)의 급수를 공급한다. 보조급수계통은 원자로 냉각재 압력과 온도가 각각 410 psia(28.8 kg/cm²A), 350 °F로 떨어지면, 정지냉각계통으로 냉각기능이 전환된다. 보조급수계통 정지를 위한 운전원 조치는 보조급수 작동신호 제거 후 수동으로 모든 보조급수펌프를 정지한다.

다. 비정상 운전

보조급수계통은 독립된 2개의 부속계통으로 구성된다.

각 부속계통은 비상운전조건 동안에도 관련 증기발생기에 보조급수를 공급한다. 소내 및 소외 교류전원 상실 시에도, 터빈구동 보조급수펌프는 각각의 증기발생기에 적절한 유량을 공급할 수 있고 모터구동 보조급수 펌프는 AAC 디젤발전기로부터 전원을 공급받아 증기발생기에 보조급수를 공급할 수 있다.

- (1) 2차측 배관 파단시 손상된 증기발생기로 배열되어 있는 보조급수 격리밸브를 30분 이내에 운전원에 의하여 수동으로 닫고 파단된 증기발생기로 보조급수 공급을 중지한다.
- (2) 2차측 배관 파단시 손상된 증기발생기로 배열되어 있는 보조급수 유량은 다음과 같은 증기발생기 압력 조건에 따라 캐비테이팅 벤츄리에 의해 제한된다.
 - 손상되지 않은 증기발생기에 공급되어야 할 최소유량은 증기발생기 압력이 1,270 psia(89.3 kg/cm²A)에서 500 gpm(1.89 m³/min) 이상이고 최대유량은 증기발생기 압력이 1,270 psia에서 750 gpm 이하이다.
 - 손상된 증기발생기로 공급되어야할 최대유량(증기발생기 압력은 판단지점에 따라 대기압 혹은 격납건물 압력임)은 750 gpm 이하이다.

제 4 장 증기발생기 고수위 발생시 발전소 영향검토

제 1 절 증기발생기 고수위의 정의와 조치절차

WH1000형 기준으로 증기발생기 과충수는 협역수위 78 % 이상인 증기발생기로 정의한다. 증기발생기 협역수위가 96 %(CV 비정상 상태시 : 90 %) 이상 증가하였다면 증기발생기 과충수에 의한 영향을 평가해야 한다. SG고수위는 원자로를 정지시키는 초기사건에 의하거나 원자로 정지 후에는 발전소의 다른 조건과 복합하여 발생할 수 있다.

냉각재 평균온도 '저' + 원자로 정지 신호 또는 안전주입 신호는 SG로 공급되는 주급수 유량을 차단시킨다. 이때, 보조급수계통은 자동으로 보조급수 유량을 노심 붕괴 열 제거에 필요한 2차측 냉각수를 공급한다.

급수가 차단된 후 운전원은 E-0(원자로 트립 또는 SI)에서 적절한 급수 조절과 차단밸브의 단힘을 확인한다. 이것은 과도한 주급수 추가로 인한 SG 과충수가 되지 않을 것임을 보증한다. 운전원은 SG 협역수위를 기준 수위인 5 ~ 50%로 유지 및 복구하기 위해 보조급수 유량을 조절한다. SG 고수위 상태는 또한 SG 전열관 파열시에도 발생한다.

SG 전열관 파열시 회복절차서 FR-H.3(SG 고수위시 조치)은 활용된 증기발생기 수위 복구기술로서 비상-3(SG 관파열) 또는 부수-3(계열²⁾로 전환할 것인지를 결정한다.

증기발생기 과충수 방지를 위한 주요조치사항은 다음과 같다.

첫째, 영향 받은 증기발생기 차단한다. 운전원은 주급수펌프가 정지되고 영향 받은 SG의 주급수가 차단되었는지 확인하여 영향을 받은 증기발생기를 차단한다.

둘째, 운전원은 영향 받은 SG 수위증가를 최소화하기 위해 보조급수유량을 차단한다.

셋째, 영향을 받은 증기발생기 방사능 점검한다.

넷째, 영향을 받은 증기발생기로부터 취출수를 형성시킨다.

2) 부수 - 3계열 : 부수 - 3.1(원자로냉각재 상실사고를 동반한 SG 전열관 파열 - 과냉각상태 복구),
 부수 - 3.2(원자로냉각재 상실사고를 동반한 SG 전열관 파열 - 포화상태 복구),
 부수 - 3.3(가압기 압력제어 상실사고를 동반한 SG 전열관 파열)

제 2 절 증기발생기 과충수의 부정적인 영향

NRC Generic Letter 81-28에서는 SG 과충수시 발전소영향을 다음과 같이 분석하였다.

1. 응축에 의한 수격현상

물이 증기관으로 유입되면 증기가 응축되고 응축에 의한 수격현상이 발생할 수 있다. 응축이 일어나는 지점의 압력이 감소하여 물 덩어리를 가속시키게 되고, 이 물 덩어리가 배관의 굴곡부에 충돌하게 되면 상당한 충격 부하를 전달하게 된다. 이러한 동적 하중은 축방향 하중이나 굽힘 또는 회전 모멘트를 유발하여 증기관의 급격한 요동이 일어나게 하고, 결과적으로 배관 행거, 지지구조물, 밸브 운전자 등에 손상을 입힐 수 있다. 증기관 행거와 지지구조물이 파손될 경우 지지가 불충분할 수 있으며 밸브를 개폐할 수 없게 되거나 증기관이 건진성을 상실하게 된다. 손상될 수 있는 부품들에는 주증기관 격리밸브, 안전밸브, 체크밸브, 터빈 정지밸브, 우회밸브 등이 포함된다.

2. 과도한 증력하중

과충수가 계속되면 상당한 양의 과냉각 상태의 물이 증기관으로 들어가게 된다. 물의 추가 하중에 의해 증기관 스프링지지 구조물의 설계기준 응력한계가 초과되어 증기관이 심하게 변형될 수 있다.

3. 밸브의 개방 고착

수력학적 하중 또는 물 덩어리에 의해 생성된 압력파에 의해 증기관의 안전밸브들이 열릴 수 있다. 증기발생기 과충수시에는 이상류 또는 물을 배출하기 위해 이 밸브들이 사용될 수 있는데, 이러한 환경에 맞도록 설계되지 않았기 때문에 열렸다가 다시 닫히지 않을 가능성이 있다. 이러한 압력파 또는 유동 하중에 의해 개방 고착될 수 있는 밸브들에는 주증기 격리밸브, 터빈 정지밸브, 터빈 우회밸브, 대기덤프밸브 등이 있다. 하류 배관의 파손 또는 우회 밸브의 개방 고착과 함께 안전밸브 또는 대기덤프밸브들이 개방 고착되거나 주증기 격리밸브가 닫히지 않았을 경우에는

2차 계통 방출이 발생하고 증기발생기 과충수에 의한 1차 계통 과냉각 과도상태를 더욱 심화시킬 수 있다. 또한, 과충수된 상태에서 증기발생기 방출이 발생할 경우 분석되지 않은 1차 계통 냉각 및 이에 따른 반응도 과도상태가 발생할 수 있다.

4. 보조급수펌프 터빈 고장

바람직한 붕괴열 제거 방법은 비상급수계통을 통해 급수를 하면서 증기발생기로 열을 제거하는 것이다. 설계에 따라, 급수펌프는 터빈이나 모터, 또는 두 가지 모두를 사용하여 작동될 수 있다. 증기관으로 물이 유입될 경우 터빈구동 보조급수펌프를 구동하는 터빈에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 비상 터빈을 위한 증기관은 보통 주증기관의 MSIV 상류에 연결되어 있다. 주증기관의 수력학적 하중 또는 액체가 터빈에 전달될 경우 터빈이 정지되고 이에 따라 해당 비상급수펌프를 사용할 수 없게 된다. 증기의 상실에 의해서만 터빈의 구동력을 상실하는 것이 아니라 터빈으로 들어오는 물에 의해 터빈이 심각하게 손상될 수 있고 구동할 수 없게 되며 압력경계가 위협받을 수 있다. 모든 비상급수펌프의 구동을 터빈에 의존하는 발전소의 경우에는 이 문제가 주요한 안전 현안이다.

5. 축적된 물의 가속

주증기관 및 연결배관의 설계와 배치에 있어서 중요한 고려사항 중 하나는 배관의 열팽창에 의한 응력이다. 이 응력을 허용가능한 범위 내에 유지하도록 하기 위하여 격납건물 내부의 배관에는 가끔 ‘U’ 밴드를 설치해서 열팽창을 흡수하도록 한다. 만약 이 ‘U’ 밴드가 수직으로 설치되어 있다면 마노미터처럼 작용하여 증기관으로 물이 유입될 때 내부에 물이 고이게 될 것이다. 대기 덤프밸브, 2차 계통 안전밸브, 우회밸브 등 ‘U’ 밴드 상류의 어떤 밸브를 개방할 경우 ‘U’ 밴드에 의해 가두어져 있던 물이 가속될 수 있다. 빠른 속도로 이동하는 물의 운동량은 배관 내의 다른 밴드 또는 밸브 등에 의해 물의 운동 방향이 바뀔 경우 배관 지지구조물을 파손시킬 수 있고, 증기관 파단 또는 밸브 파단(2차측 유출)을 일으킬 수 있다.

일반적으로 주증기관 아래에 있는 터빈구동 보조급수펌프를 구동할 경우 수직 배관에 존재하는 물이 가속될 수 있다. 이 경우 역시 주증기관 뿐만 아니라 터빈구동 보조급수펌프의 증기배관에 타격을 가할 수 있고 터빈에 과도한 손상을 입힐 수도 있다.

제 5 장 WH1000형과 OPR1000형 원전 비교 분석

제 1 절 증기발생기 차이점 분석

표 5.1 WH1000형 원전과 OPR1000형 원전의 증기발생기 제원상의 차이점

변 수		WH 1000형 원전	OPR1000형 원전	$\frac{OPR1000}{WH1000}$
공통	증기발생기 수	3	2	0.666667
	열전달율(0.2% 취출시 증기발생기별)	928.2 × 10 ⁶ kcal/hr (3,168 × 10 ⁶ Btu/hr)	1,215.6 × 10 ⁶ kcal/hr (4,824 × 10 ⁶ Btu/hr)	1.309632
1차측	설계압력 / 온도	174.7 kg/cm ² A / 343.3 °C (2,485psia / 650 °F)	175.8 kg/cm ² A / 343.3 °C (2,500 psia / 650 °F)	1.006297
	냉각재 입구온도	326.6 °C (619.9 °F)	327.3 °C (621.2 °F)	1.002143
	냉각재 출구온도	291.5 °C (556.7 °F)	295.8 °C (564.5 °F)	1.014751
	냉각재 유량	16.5 × 10 ⁶ kg/hr (36.4 × 10 ⁶ lb/hr)	27.56 × 10 ⁶ kg/hr (60.75 × 10 ⁶ lb/hr)	1.670303
	냉각재 체적	27.35 m ³ (966 ft ³)	51.9 m ³ (1,834 ft ³)	1.897623
	전열관 크기 (외경)	17.48 mm (0.688 inch)	19.1 mm (0.75 inch)	1.092677
	전열관 두께 (공칭)	1.02 mm (0.040 inch)	1.07 mm (0.042 inch)	1.04902
	전열관 수	5,626개	8,214 개	1.460007
2차측	설계압력 / 온도	83.3 kg/cm ² A / 316 °C (1,185 psia / 600 °F)	89.3 kg/cm ² A / 301.7 °C (1,270 psia / 575 °F)	1.072029
	증기압력 (증기노즐 끝에서)	66.7 kg/cm ² A (964 psia)	75.2 kg/cm ² A (1,070 psia)	1.127436
	증기유량(0.25% 습분 상태에서 증기발생기별)	1.8579 × 10 ⁶ kg/hr (4.1 × 10 ⁶ lb/hr)	1.442 × 10 ⁶ kg/hr (3.18 × 10 ⁶ lb/hr)	0.776145
	전출력에서 급수온도	226.7 °C (440 °F)	232.2 °C (450 °F)	1.024261
	증기노즐 수량/내경	7개 / 152 mm(6 inch)	2개 / 6128 mm(24125 inch)	0.285714
	평균 열전달계수 (설계치)	2,784.6 kcal/hr · m ² · °C (570.3 Btu/hr · ft ² · °F)	2,941 kcal/hr · m ² · °C (602.25 Btu/hr · ft ² · °F)	1.056166

분석결과 WH1000형이 OPR1000형에 비해 증기발생기가 1대 적음으로 인해 증기발생기당 1차측 냉각재 유량은 1.67정도, 냉각재 체적은 1.89배 정도 차이가 났다. 전열관 수의 차이로 인해 급수온도의 차이도 있는 것으로 나타났다. 증기발생기 체적이 OPR1000형에 비해 적다보니, 증기발생기 만수위 도달시간이 훨씬 빠르고, 수위제어 측면에서도 좀 더 세밀한 제어가 요구된다.

제 2 절 보조급수계통 차이점 분석

1. 보조급수펌프

표 5.2 WH1000형 원전과 OPR1000형 원전의 보조급수펌프 비교

변 수		WH 1000형 원전	OPR1000형 원전
펌 동 기 구 동	갯수	2	2
	형태	수평, 원심형	수평, 원심형
	속도 (rpm)	3,560	3,579
	최소 재순환율 (gpm)	100	52.8
	실양정 (ft)	3,450 ft	3,600 ft (1,098 m)
	정격용량 (대당)	550 gpm	550 gpm
터 빈 구 동	갯수	1	2
	형태	수평, 원심형	수평, 원심형
	속도 (rpm)	3,550	7,870
	최소 재순환율 (gpm)	145	120
	실양정 (ft)	3550 ft	3,600 ft
	정격용량 (대당)	550 gpm	550 gpm

분석결과 터빈구동 보조급수 펌프 대수에서 WH1000형은 1대, OPR100형은 2대로 대수에서 차이점은 있었으나, 이외에 펌프 성능적인 측면에서는 큰 차이점은 없었다.

2. 보조급수 제어

표 5.3 WH1000형 원전과 OPR1000형 원전의 보조급수제어 비교

WH 1000형 원전	OPR1000형 원전
가. 유량제어밸브 - 신호발생시 완전열림 상태를 유지. - 유량조절은 수동만 가능	가. 유량 제어밸브 - CLOSE/MOD" 모드로 자동 전환 (Solenoid 여자) - 유량제어기 설정값(30.0% WR)에 따라 수위 제어
나. 증기발생기 취출수격리밸브 Close	나. 증기발생기 취출수격리밸브 Close
다. 증기발생기 시료채취밸브 Close	다. 증기발생기 시료채취밸브 Close
라. 비상디젤발전기 정지상태	라. 비상디젤발전기 자동기동 및 대기상태

분석결과 보조급수 기동신호발생시 증기발생기 수위 자동 조절 능력은 OPR1000형은 갖추고 있으나, WH1000형은 없어 증기발생기 과충수 방지를 위해 운전원이 수동으로 조절해 주어야 한다. 이와 함께, WH1000형은 OPR1000형과 다르게 비상 디젤발전기가 AFAS와 함께 기동되지 않아 수동정지를 할 필요는 없다.

3. 보조급수 동작신호

표 5.4 WH1000형 원전과 OPR1000형 원전의 보조급수 동작신호 비교

WH 1000형 원전	OPR1000형 원전
가. MD AFAS - 모든 주급수펌프 정지 - 증기발생기 한대 저-저 수위(2/4, 17 %) - 안전주입신호 - 4.16 kV 모선 저전압 및 디젤발전기 차단기 투입 - 원자로정지불능 완화계통 동작 나. TD AFAS - 증기발생기 2/3 대 저-저 수위 (2/4, 17 %) - 4.16 kV 모선 저전압 및 디젤발전기 차단기 투입 - 원자로정지불능 완화계통 동작	가. ESFAS AFAS - AFAS 1 : SG 1 Level ≤ 23.6%(WR) - AFAS 2 : SG 2 Level ≤ 23.6%(WR) - 수동작동 : 주제어실 또는 ESFAS ARC 작동 스위치 나. DPS ³⁾ AFAS(보조급수 작동신호) - DPS AFAS 1 : SG 1 Level ≤ 22.1%(WR) - DPS AFAS 2 : SG 2 Level ≤ 22.1%(WR)

분석결과 WH1000형은 주급수펌프 정지, 모선 저전압, 안전주입 신호, 원자로 정지불능 완화신호등 여러 신호들이 보조급수기동신호와 연동되어 있으나, OPR1000형은 단순히 증기발생기 저수위로만 연결되어 있다.

WH1000형은 증기발생기 수위 17%에서 작동하여 OPR1000형에 비해 낮은 수위에서 보조급수신호가 작동되나, 이는 SG 용량의 차이로 인해 WH1000형이 OPR1000형에 비해 여유도가 없기 때문이다.

3) 다중보호계통(DPS) : 원자로보호계통과 공학적 안전설비 작동계통에 공통모드 고장이 발생하여 제 기능을 수행하지 못할 경우 발전소를 안전하게 유지하기 위하여 설계된 계통

제 6 장 WH1000형 원전의 보조급수계통 유효성 연구

제 1 절 연구 목표

본 연구에 앞서 한빛2호기 13.8kV 비안전모선 계기용변압기(PT) 소손으로 인한 원자로 자동정지 사건과 고리4호기 RCP 'B' 써지보호기 고장으로 인한 원자로 자동정지 사건을 비교검토 하였다. 두 사건은 사건경위 및 원인이 매우 유사한 사례였으나, 원자력안전위원회 사고등급결과 각각 0등급, 1등급을 부여 받았다. 조사결과 고리4호기는 보조급수 유량조절과 증기덤프 차단 등 절차서 이행 과정에서 미비점이 있었으며, 이로 인해 원자로냉각재 평균온도가 273℃까지 낮아진 것이 지적되었다.

아울러 제3장에서 분석한 바와 같이 증기발생기 용량 측면과 보조급수 제어 측면에서 WH1000형이 증기발생기 수위제어 측면에서 취약점이 발견되었다.

이상 두 가지 사항에 대해 착안하여 연구목표를 다음과 같이 설정하였다.

첫째, RCP 1대 정지시 1차측 과냉방지를 위한 최적 보조급수 유량제어 시점 도출
둘째, 각 비상조건별, 출력별 증기발생기 과충수 시점 도출

이상 두가지 연구 목표를 달성하기 위해 한빛1호기 시뮬레이터를 통해 간접적으로 연구 성과를 이끌어 낼 예정이다.

제 2 절 연구 방법

1. 절차서 검증

한빛1발전소 절차서를 대상으로 하였으며, 연구대상 비상절차서는 다음과 같다.

- 보조-0.1(원자로 트립시 조치) : RCP 'B'정지
- 부수-0.0(모든 교류전원 상실) : 기동변압기 정지 + 비상디젤발전기 정지
- 비상-3(SG 전열관 파열) : SG 'B' 전열관 완전 파단

2. 중점 관찰사항

보조-0.1(원자로 트립시 조치) 절차서는 RCP 'B'를 인위적으로 정지시켜, Tavg(원자로냉각재 온도) 변화를 관찰하여 최적의 보조급수 정지시점을 도출할 예정이다.

부수-0.0(모든 교류전원 상실) 절차서와 비상-3(SG 전열관 파열) 절차서는 원자로 정지 후 증기발생기 만수위에 걸리는 시간을 측정할 예정이다. 하지만 시뮬레이터 초기조건은 원자로 출력 100%와 2%로 나누어서 연구할 예정이다. 이처럼 원자로출력을 두 가지로 나눈 이유는 다음과 같은 WH1000형만의 주급수 제어특성 때문이다.

가. 증기발생기 수위측면

- (1) 원자로출력 5 ~ 20%에서 저출력 급수조절밸브(LPCV)와 주급수 조절밸브(MFCV)가 중첩운전
- (2) P4(원자로정지신호) + Lo Tavg(295.5℃) → MFCV 차단(RCS 과냉방지)
- (3) FWIS(주급수 차단신호) : SIS, SG LVL HI-HI → MFCV+LPCV Close
 - ※ 추론 : 원자로 출력 5% 이하 + 단순 원자로정지 → LPCV 차단 안됨
→ SG수위 감소폭이 적을 것으로 예상 → SG 만수위 시간이 짧아질 것으로 예상

나. 보조급수펌프 기동신호 측면

- (1) 모터구동 보조급수펌프 기동신호
 - ① Manual ② All MFWP Stop ③ 1대 S/G LVL Lo-Lo(2/4CH)
 - ④ LOV (D/G CKT BKR Closed) ⑤ SIS ⑥ C-20(AMS)동작
- (2) 터빈구동 보조급수펌프 기동신호
 - ① Manual ② 2대 이상 S/G LVL Lo-Lo(2/4CH)
 - ③ LOV (D/G CKT BKR Closed) ④ C-20(AMS)동작
 - ※ 추론 : 원자로 출력 5% 이하에서는
SG수위 저수위 미발생 + SI : 모터구동보조급수 펌프만 기동
SG수위 저수위 미발생 + 모든 교류전원 상실 : 터빈구동 보조급수 펌프만 기동

제 3 절 연구 결과

1. 원자로냉각재펌프(RCP) 정지 후 원자로냉각재 온도(Tavg) 변화 가. RCP 'B' 정지 곡선

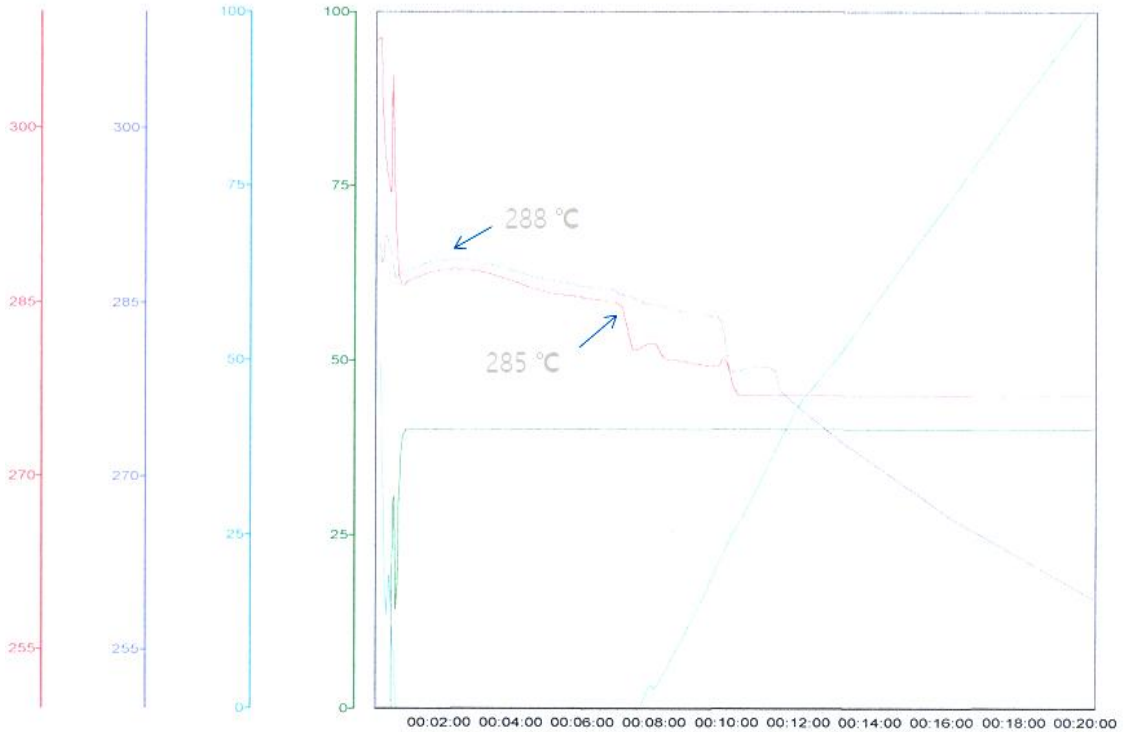


그림 6.1 원자로냉각재펌프 정지 후 원자로냉각재 온도 곡선

(1) 실험 결과

RCP 'B' 정지로 인해 원자로냉각재 저유량에 의한 원자로 정지가 발생하였다. 제어봉 삽입으로 인해 급격하게 Tavg가 감소하다가, 증기덤프가 P-12 신호에 의해 닫히면서 288°C에서 약간 증가하였다. 이후 온도가 낮은 보조급수가 증기 발생기로 주입 되면서 온도는 서서히 감소하다가 285°C에서 급격히 감소하는 것을 보여주고 있다.

※ 참고 사항 : Tavg 계측기 최소값은 277°C이므로 277°C 도달 후 Tavg 직선 형태임.

2. 모든 교류전원 상실시 SG 수위 변화

가. 원자로출력 100%

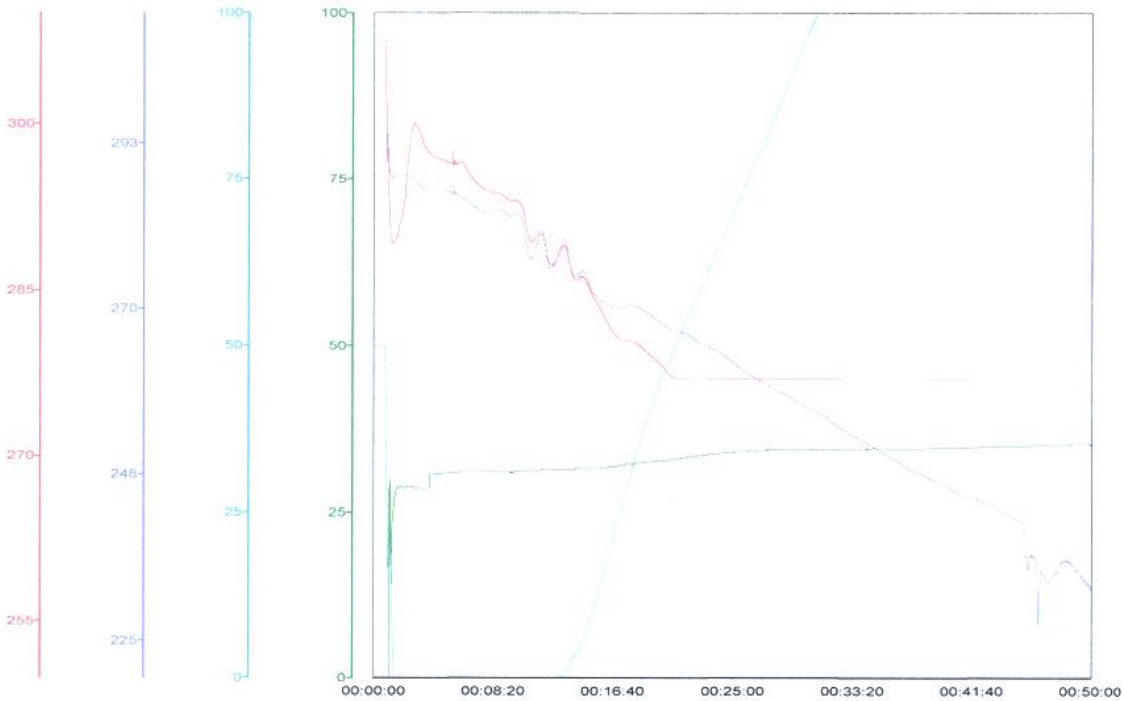


그림 6.2 원자로출력 100 %에서 모든 교류전원 상실(SBO)시 증기발생기 수위 곡선

(1) 실험 결과

원자로출력 100 %에서 원자로 정지 후 터빈구동보조급수펌프가 모든 교류전원 상실(LOV)신호에 의해 기동이 되었고, 이후 절차서에서 요구하는 증기발생기 협역수위 7% 도달까지는 원자로 정지 후 13분 48초가 소요되었다. 이후 증기발생기 협역수위 100 % 도달까지는 27분 35초가 소요되는 결과가 나왔다.

나. 원자로출력 2%

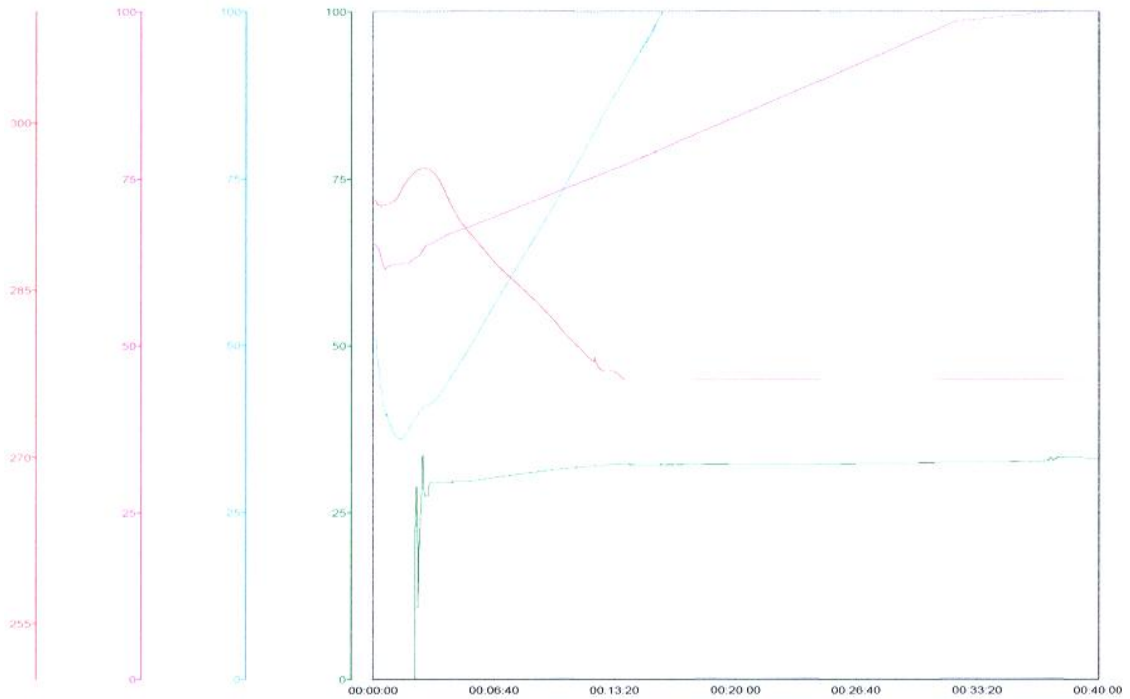


그림 6.3 원자로출력 2 %에서 모든 교류전원 상실(SBO)시 증기발생기 수위 곡선

(1) 실험 결과

원자로출력 2 %에서는 원자로 정지 후 터빈구동보조급수펌프가 LOV신호에 의해 기동되었다. 원자로 출력 2%에서는 주급수제어가 MFCV가 아닌 LPCV (저출력 급수제어밸브)에 의해 이루어지므로, P4(원자로정지신호) + Lo Tavg (295.5℃)가 발생하더라도 증기발생기 수위가 크게 감소하지 않고 단순히 1차 측 냉각으로 인해 온도 감소만큼 수축되어 감소할 뿐이다. 따라서 증기발생기는 약 35 %까지만 감소하고 이후 보조급수 공급에 의해 계속 증가하여 원자로 정지 후 약 16분 만에 협역수위가 만수위에 도달한다.

3. 증기발생기 관파열시 SG 수위 변화

가. 원자로출력 100%

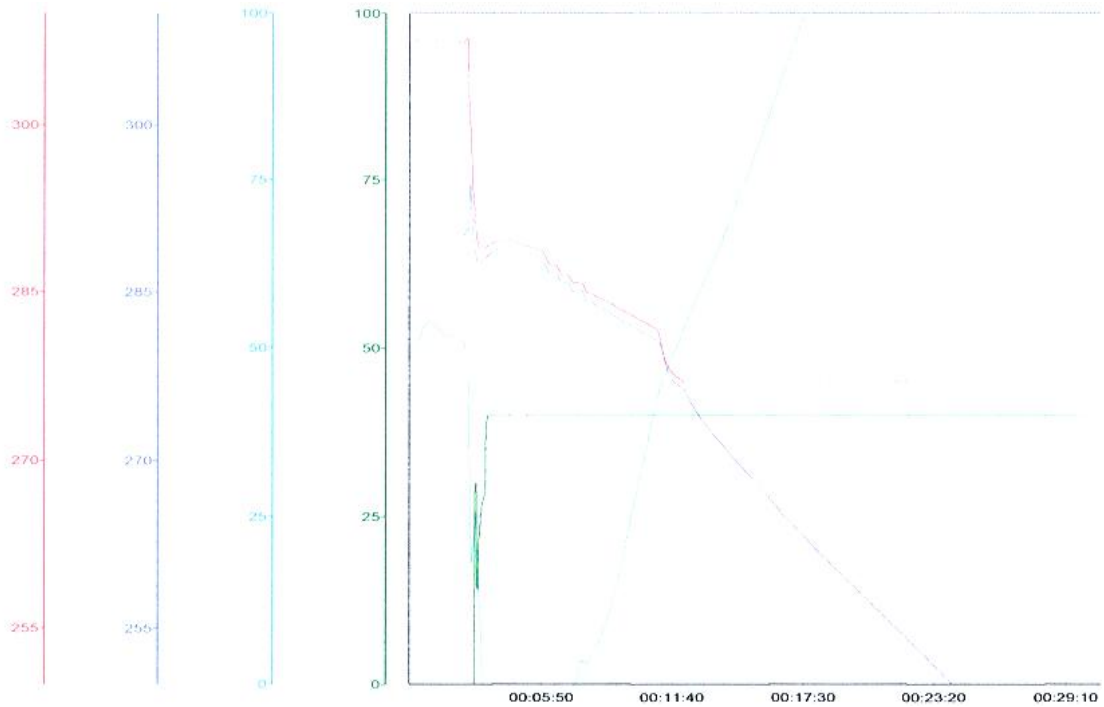


그림 6.4 원자로출력 100 %에서 증기발생기 관파열시 증기발생기 수위 곡선

(1) 실험 결과

원자로출력 100 %에서는 원자로 정지 후 MFCV차단으로 인해 보조급수펌프가 모두 기동되어 최대유량으로 증기발생기에 급수가 공급되었다. 그리고 정지 후 약5분 21초 만에 절차서에 요구하는 증기발생기 협역수위 7 %에 도달하였고, 이후 14분6초 만에 증기발생기 만수위에 도달하였다.

나. 원자로출력 2 %

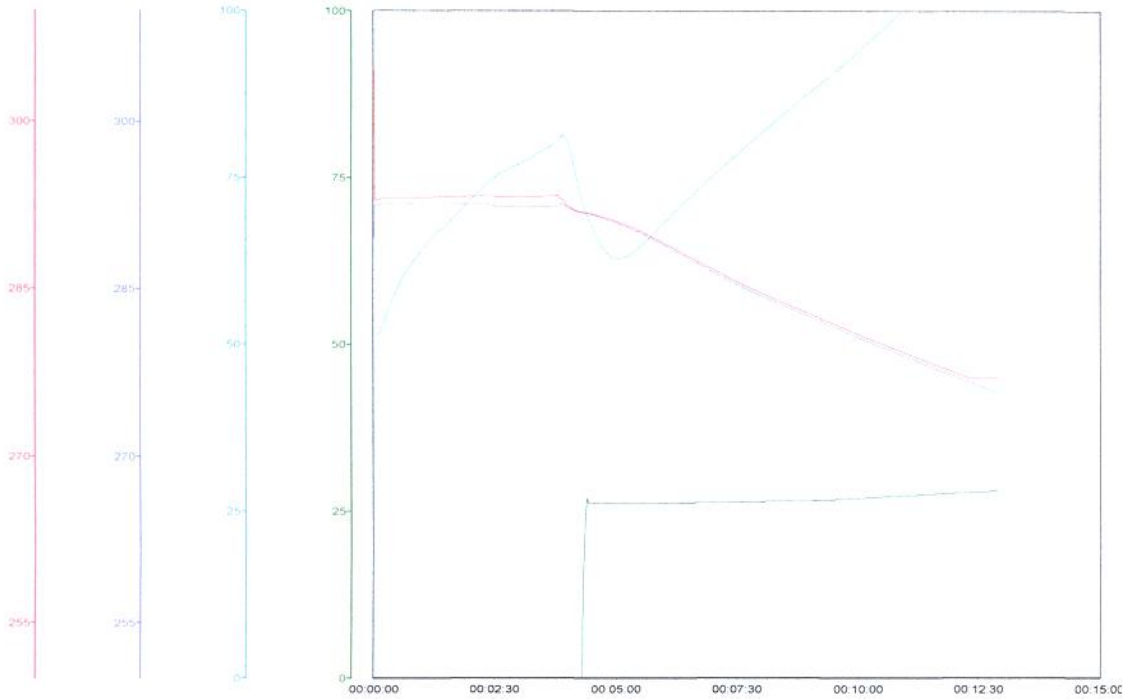


그림 6.5 원자로출력 2 %에서 증기발생기 관파열시 증기발생기 수위 곡선

(1) 실험 결과

원자로출력 2 %에서는 원자로 정지 후 원자로냉각재가 1차측과 2차측의 차압으로 인해 2차측으로 밀려들어 오면서 계속 증기발생기 수위가 증가하였다. 이후 가압기 저압력으로 인한 안전주입 신호가 발생하여 모터구동 보조급수 펌프가 약 4분 20초에 기동되고, 2차측 급수의 수축으로 인해 증기발생기 수위가 감소하였다. 그리고 2차측 급수의 온도평형이 이루어지면서 서서히 증가하기 시작하여 11분 15초 만에 증기발생기 만수위에 도달하였다.

제 4 절 개선방법

1. RCP 한 대 정지시 T_{avg} 감소에 대한 개선방법

단순 RCP 정지의 경우 T_{avg} 온도가 285 °C에서 급격하게 감소하는 것을 연구를 통해 도출하였다. 따라서 지속적인 온도감소방지 방안으로 개선방안을 다음과 같이 제시한다.

절차서 보조-0.1(원자로 트립시 조치) 단계 1.0에 “만일 온도가 285 °C 까지 계속 감소되었다면, 다음을 수행한다.” 를 삽입하여 증기덤프 차단, 보조급수유량 제어를 취할 수 있도록 한다.

2. 증기발생기 만수위 대처방안

모든 교류전원 상실사고와 증기발생기 관파열 사고시 증기발생기 만수위가 빠르게 이루어지는 것을 알 수 있었다. 특히, WH1000형의 보조급수 조절밸브의 경우 운전원의 수동조작 없이는 완전 열림상태를 계속 유지하므로 운전원의 개입이 없다면 증기발생기 만수위 도달시간이 OPR1000형에 비해 빠르게 진행된다. 이와 같은 문제점을 해소하기 위한 개선방안을 다음과 같이 제시한다.

첫째, 저출력(R_x 20 %이하)상태에서 모의제어반을 통한 지속적인 훈련 비상시 적절한 터빈운전원의 보조급수 제어의 개입을 위해 기존의 고출력에서의 모의제어반 훈련 뿐만 아니라, 저출력에서 반복적인 훈련을 통해 증기발생기 수위를 안정화 시키는 노력이 필요하다.

둘째, 비상절차서상 SG 수위조절 조치사항을 절차서 앞으로 전진 배치한다.

SG 수위점검 및 보조급수유량조절 조치사항이 부수-0.0(모든 교류전원 상실) 절차서는 13.0단계에 있으며, 비상-3(SG 관파열)은 비상-0(원자로정지) 21단계 후 비상-3(SG 관파열) 3단계에 있다.

따라서 해결책으로는 SG 수위점검 및 보조급수유량조절 조치사항을 부수-0.0(모

은 교류전원 상실) 5.0단계로 전진배치하고, 비상-3(SG 관과열) 경우는 비상-0(원자로정지)의 견출참조 페이지로 배치해야 할 것이다.

참고로 견출참조페이지란 최적복구절차서(ORP) 마지막장으로 비상 상태 회복절차 수행 중 일련의 중요하고 지속적인 감시항목을 제공하며, 절차서 진행 중에 조건이 만족되면 즉시 해당조치를 취해야 하는 사항을 목록화한 것이다.

셋째, 비상시 보조급수 유량조절이 SG 수위에 의해 이루어 질수 있도록 설계변경 추진한다. 증기발생기 수위를 전송하는 LY(수위전송기)를 신설 및 보조급수 펌프 출구밸브에 연결하여 증기발생기 수위에 따라 보조급수펌프 출구밸브가 자동조절이 가능하도록 하여 비상시 운전원의 부하경감 및 증기발생기 고수위로 인한 발전소 과도상태를 방지하고자 한다.

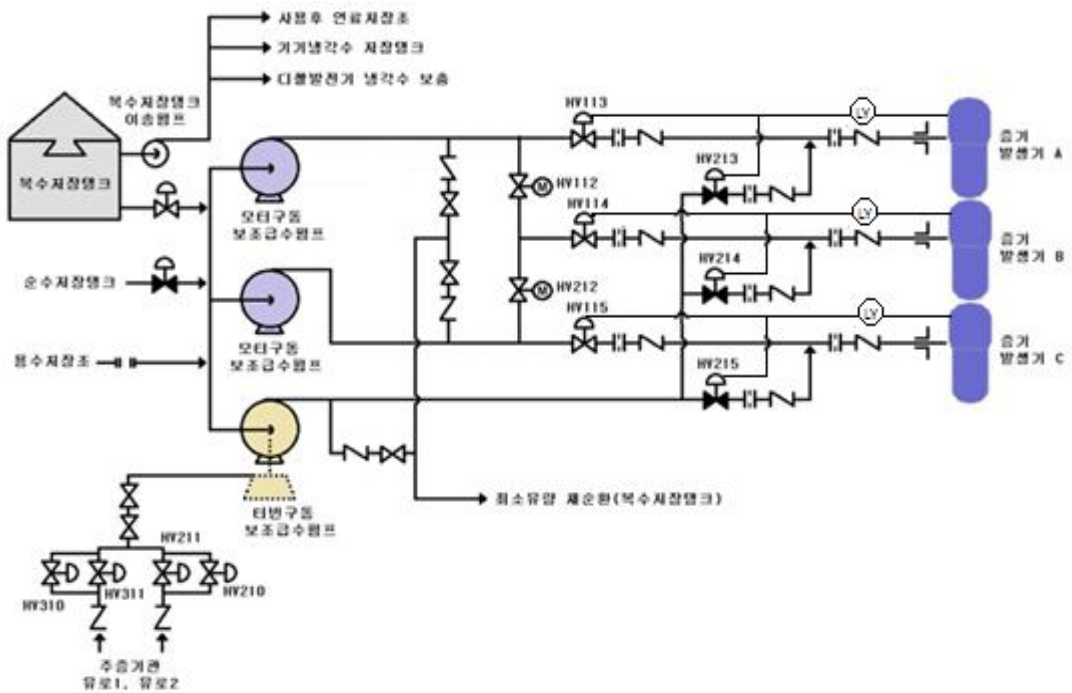


그림 6.6 증기발생기 수위전송기 신설을 반영한 보조급수계통 개략도

제 7 장 결 론

본 논문은 WH1000형 원전과 OPR1000형 원전에 증기발생기와 보조급수계통의 차이점을 토대로 WH1000형 원전의 취약점을 발견하고 해결책을 모색하였다.

WH1000형은 증기발생기가 3대인 반면에 OPR1000형에 비해 증기발생기 용량이 적다. 이로 인해 증기발생기 만수위 도달시간이 상대적으로 빠르다.

뿐만 아니라, 비상시 OPR1000형은 보조급수펌프 출구밸브 증기발생기수위에 의해 자동조절이 되는 반면에 WH1000형은 보조급수펌프 출구밸브가 완전 열려 운전원의 증기발생기 수위 유지 인지능력이 부족한 경우 증기발생기 만수위 도달하게 된다.

증기발생기 만수위에 도달하면 증기발생기와 연결된 주증기 배관으로 2차측 냉각재가 유입되어 응축에 의한 수격현상, 과도한 중력하중, 밸브의 개방 고착, 보조급수펌프 터빈 고장, 축적된 물의 가속의 문제를 일으키게 된다.

이러한 문제점과 WH1000형 원전 고유의 운전 특성을 고려하여 모의제어반을 통한 검증은 하게 되었으며, 다음과 같은 개선사항을 도출하였다.

증기발생기 과충수 방지측면에서는 첫째, 저출력(Rx 20 %이하)상태에서 모의제어반을 통한 지속적인 훈련 비상시 적절한 터빈운전원의 보조급수 제어의 개입을 위해 반복적인 훈련이 필요하다.

둘째, 비상절차서상 SG 수위조절 조치사항을 절차서 앞으로 전진 배치한다.

셋째, 비상시 보조급수 유량조절이 SG 수위에 의해 이루어 질수 있도록 설계변경 추진한다. 증기발생기 수위 전송기(LY)를 신설 및 보조급수펌프 출구밸브에 연결한다.

추가적으로 한빛2호기 13.8kV 비안전모선 계기용변압기(PT) 소손으로 인한 원자로 자동정지 사건과 고리4호기 RCP 'B' 써지보호기 고장으로 인한 원자로 자동정지 사건을 비교 검토하여, RCP 1대 정지시 1차측 과냉방지를 위한 최적 보조급수 유량제어시점을 원자로냉각재 온도 285 ℃로 도출하였으며, 이와 연관된 절차서 변경사항을 개선사항으로 제시하였다.

저자는 본 연구가 노후 원전인 WH1000형 원전의 안전성 확보에 기여하여 원전에 대한 국민의 신뢰확보에 보탬이 될 거라고 확신한다.

참 고 문 헌

- 1) 한빛1,2호기 계통설명서, 2006
- 2) 한빛5,6호기 계통설명서, 2006
- 3) 한국원자력안전기술원, 원전 사고·고장 조사보고서(2015-03호) “한빛2호기 스위치 야드 차단기 비정상 개방으로 인한 원자로 자동정지”, 2015
- 4) 한국원자력안전기술원, 원전 사고·고장 조사보고서(2015-05호) “고리4호기 썬지보호기 손상에 따른 원자로냉각재펌프 'B' 정지로 인한 원자로 자동정지”, 2015
- 5) 한빛1,2호기 “ 보조-0.1(원자로 트립시 조치)” 운영절차서
- 6) 한빛1,2호기 “ 비상-3(증기발생기 관파열)” 운영절차서
- 7) 한빛1,2호기 “ 부수-0.0(모든 교류전원 상실)” 운영절차서
- 8) NRC Generic Letter 81-28