



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](#)

2016년 2월  
석사학위 논문

한국 표준형 원전 원자로 정지 후  
2차측 증기방출 제어방법 개선 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

임 영 균

# 한국 표준형 원전 원자로 정지 후 2차측 증기방출 제어방법 개선 연구

A study on the improvement of a steam dump control  
after reactor trip in OPR-1000

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

임 영 균

# 한국 표준형 원전 원자로 정지 후 2차측 증기방출 제어방법 개선 연구

지도교수 : 이 경 진

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

임 영 균

## 임영균의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 나만균 (인)

위 원 조선대학교 교수 김종현 (인)

위 원 조선대학교 교수 이경진 (인)

2015년 11월

조선대학교 대학원

# 목 차

ABSTRACT .....	vi
<b>제 1 장 서 론 .....</b>	<b>1</b>
<b>제 2 장 원자력 발전소와 증기우회 제어계통 .....</b>	<b>3</b>
제 1 절 증기우회 제어계통 개요 .....	3
1. 증기우회 제어계통 기능 .....	3
2. 증기우회 제어계통 구성 .....	3
제 2 절 증기우회 제어계통 제어 .....	7
1. 제어 신호 .....	7
2. 연동 신호 .....	12
제 3 절 원자로 정지 후 RCS 냉각 .....	15
1. RCS 냉각 절차 .....	15
2. 원자로 정지 후 RCS 수동 냉각 .....	16
<b>제 3 장 RCS 수동 냉각시 문제점 도출 .....</b>	<b>18</b>
제 1 절 수동제어의 어려움 존재 .....	18
1. RCS 냉각률 비선형성 .....	18
2. 운전 여유도 감소 .....	20
제 2 절 가압 열충격 유발 위험 내재 .....	21
1. 가압 열충격 .....	21
2. 무연성 천이온도 .....	21
3. 원자력 발전소에서의 냉각률 제한 .....	22
<b>제 4 장 증기우회 제어계통 개선 방안 .....</b>	<b>23</b>
제 1 절 물의 포화온도 및 압력 특성 .....	23

1. 포화증기 표 .....	23
2. 포화증기 곡선 .....	24
제 2 절 주증기 압력신호를 이용한 자동 제어 .....	25
1. 주증기 압력 .....	25
2. 자동 제어 방법 .....	25
3. 시뮬레이터를 이용한 모의시험 .....	27
제 3 절 RCS 온도신호를 이용한 자동 제어 .....	30
1. RCS 평균온도 .....	30
2. 자동 제어 방법 .....	31
3. 시뮬레이터를 이용한 모의시험 .....	31
제 4 절 증기우회 제어계통 개선 방안 비교 .....	34
1. 장·단점 분석 .....	34
2. 개선방안 비교 .....	34
<b>제 5 장 결론 .....</b>	<b>36</b>
참고문헌 .....	37

## 표 목 차

표 2-1 증기우회 제어밸브 구성 .....	6
표 3-1 핵분열 후 방출되는 에너지 .....	18
표 3-2 원자로 정지 후 방출되는 붕괴열 .....	19
표 4-1 포화증기표 .....	23
표 4-2 증기우회 제어계통 개선 방안 비교 .....	34



# 그림 목 차

그림 1-1 원자력 발전소 제어 계략도 .....	1
그림 2-1 증기우회 제어계통 계략도 .....	3
그림 2-2 Flat Panel Display .....	4
그림 2-3 증기우회 제어계통 각종 핸드스위치 .....	5
그림 2-4 증기우회 제어밸브 .....	5
그림 2-5 원자로 출력에 따른 주증기 압력 .....	7
그림 2-6 조절모드 설정값 프로그램 .....	8
그림 2-7 가압기 압력에 따른 설정값 프로그램 .....	8
그림 2-8 주증기 모관압력 설정값 프로그램 .....	8
그림 2-9 증기 우회밸브 제어 프로그램 .....	9
그림 2-10 밸브 허용 요구신호 .....	10
그림 2-11 급속열림 채널 .....	10
그림 2-12 복수기 연동신호 및 Emergency Off 회로 .....	12
그림 2-13 AWP 신호발생 회로 .....	12
그림 2-14 AMI 신호발생 회로 .....	13
그림 2-15 증기우회 제어계통 기능선도 .....	14
그림 2-16 RCS 수동냉각시 냉각재 평균온도 및 증기발생기 압력 .....	16
그림 2-17 RCS 수동냉각시 가압기 압력 및 수위 .....	17
그림 3-1 후쿠시마 사고 후 발전소별 잔열 그래프 .....	19
그림 3-2 전출력에서의 RCS 압력/온도 제한곡선 .....	22
그림 4-1 포화증기 곡선 .....	24
그림 4-2 원자로 출력에 따른 증기우회 제어계통 설정값 .....	25
그림 4-3 포화증기 곡선(증기발생기 냉각구간) .....	26
그림 4-4 주증기 압력 변화 그래프 (시간당 10 kg/cm <sup>2</sup> 씩 감압 제어) .....	28
그림 4-5 주증기 압력 변화 그래프 (시간당 25 kg/cm <sup>2</sup> 씩 감압 제어) .....	28
그림 4-6 주증기 압력 변화 그래프 (시간당 50 kg/cm <sup>2</sup> 씩 감압 제어) .....	29

그림 4-7 주증기 압력 변화 그래프 (시간당 10, 25, 50 kg/cm<sup>2</sup>씩 감압 제어) ..... 29  
 그림 4-8 원자력 발전소 주요 제어계통 연계도 ..... 30  
 그림 4-9 RCS 온도 변화 그래프 (시간당 10 °C씩 감온 제어) ..... 32  
 그림 4-10 RCS 온도 변화 그래프 (시간당 30 °C씩 감온 제어) ..... 32  
 그림 4-11 RCS 온도 변화 그래프 (시간당 50 °C씩 감온 제어) ..... 33  
 그림 4-12 RCS 온도 변화 그래프 (시간당 10, 30, 50 °C씩 감온 제어) ..... 33

## ABSTRACT

### A study on the improvement of a steam dump control after reactor trip in OPR-1000

Lim, Young Kyun

Adviser : Prof. Lee, Goung Jin, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

In a typical nuclear power plant, thermal energy in the reactor is transferred to the turbine via the steam generator. The waste heat which is not used for energy transfer is removed in the condenser by sea water. This process makes a steam cycle. If any of these goes abnormal, nuclear power plant will experience transition.

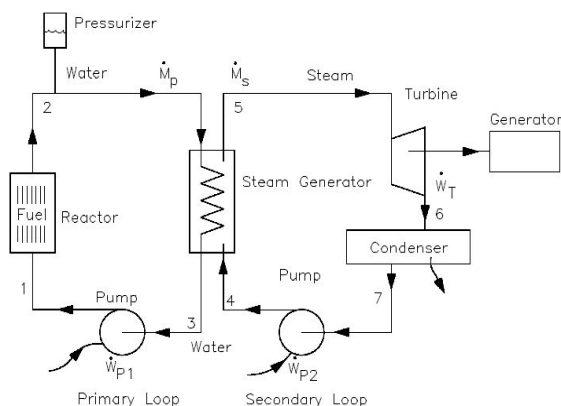


Fig-1 Control Diagram in NPP

Thus, major control systems make stable operation possible by means of proper and automatic control of plant variables. One of these control system, SBCS(Steam Bypass Control System) enables the thermal balance between primary and secondary system under load-decreasing condition such as turbine trip. And it controls RCS(Reactor Coolant System) temperature after reactor trip by regulating the amount of steam dump into the secondary system. But the RCS cooldown operation through SBCS involves many difficulties. Therefore, I set up optimized improvement plans for the way of steam dump control using SBCS system. I suggested two optimized

improvement methods for the steam control in the secondary system. Both of plans used the existing variables and I checked their validity through the simulation test.

The first method is to automatically decrease the main steam pressure setpoint by time period. Figure-2 shows the main steam pressure trends according to the pressure setpoint decreasing rate per hour(50kg/cm<sup>2</sup>.hr, 25kg/cm<sup>2</sup>.hr, 10kg/cm<sup>2</sup>.hr). And the second is to convert SBCS control variable from steam pressure to RCS average temperature and to decrease the temperature setpoint automatically by time.

Figure-3 shows the RCS temperature trends according to the temperature setpoint decreasing rate per hour(50°C/hr, 30°C/hr, 10°C/hr).

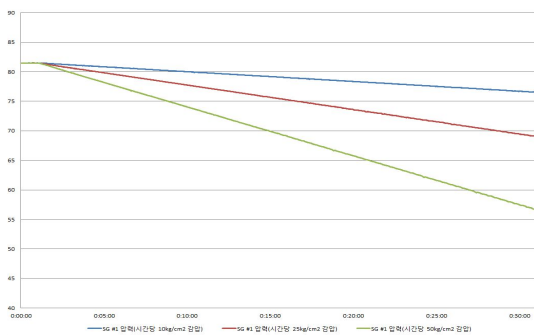


Fig-2 Main steam pressure trends

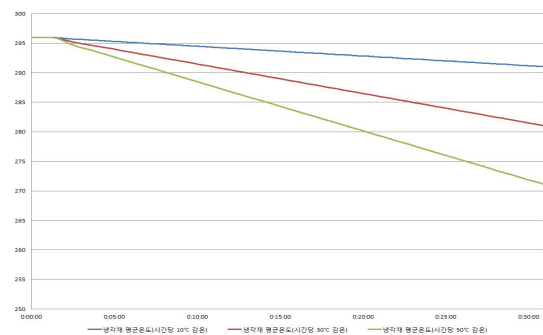


Fig-3 RCS average temperature trends

These tests were performed in a short period of time but it was sufficient to figure out that it works great with a good linearity. Automatically controlled SBCS valves enable that all crucial variables such as RCS inventory, pressure, and steam generator water level are properly controlled under these tested system. In OPR1000 nuclear power plant, operators experiences hard time for regulating SBCS manually to control the RCS temperature after the reactor trip. In order to solve this problem, I proposed setting the SBCS main variable to steam pressure or RCS temperature, and controlling automatically by using time-based function. Through the simulation tests using the simulator, it was found that these suggestions can prevent PTS caused by RCS overcooling or inadequate steam discharge to atmosphere. Through improvement of the equipment reliability and operation margin, I am certain that it can contribute to stable and safe plant operation.

## 제 1 장 서 론

원자력 발전소에서는 안정적인 전력 생산을 위해 원자로(Reactor)에서 일정한 열을 발생시키고 증기발생기(SG : Steam Generator)를 통해 적절하게 터빈으로 전달하며 에너지 전달에 이용되지 못한 폐열(廢熱)은 해수(Sea Water)를 통해 복수기(Condenser)에서 제거하는 랭킨사이클(재생-재열 사이클)을 사용한다.

이러한 일련의 과정들 중에서 어느 하나라도 정상적인 상태를 벗어나게 되면 원자력 발전소는 과도상태(Transient)를 경험하게 되므로 주요 제어 계통들이 이를 적절히 제어함으로써 원자력 발전소는 안정적인 운전이 가능하게 된다.

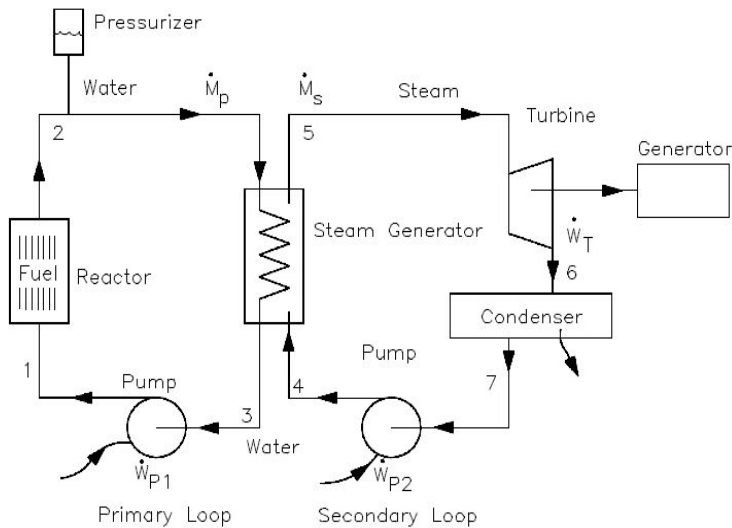


그림 1-1 원자력 발전소 제어 계략도

이들 중 증기우회 제어계통(SBCS : Steam Bypass Control System)은 정상운전 중 2차측 터빈 정지 등의 부하감발 시에도 다른 제어계통들과 조화를 이루어 원자로정지 없이 1차계통과 2차계통의 열평형상태를 유지하는 역할을 수행하며 또한 원자로 정지 후 원자로 냉각재(RCS : Reactor coolant System) 온도를 제어하는 중요한 계통이다. 증기우회 제어계통은 원자로 정지 후 원자로에서 발생하는 잔열(Residual Heat)을 적절히 제어함으로써 원자로 냉각재의 온도를 일정하게 유지하거나 정지냉각(Shutdown Cooling)이 가능한 온도( $28.8 \text{ kg/cm}^3$ ,  $176.7 \text{ }^\circ\text{C}$ )까지 냉각운전을 수행한다. 또한 이 계통은 발전소 계획예방정비(O/H : Overhaul) 이후 원자로에서 발생하는 잔

열과 RCP에서 발생하는 유동 마찰열을 적절히 제어함으로서 원자로 냉각재의 온도를 일정하게 유지하거나 원자로 냉각재 운전 정상온도/압력(NOT/NOP)까지 가열운전을 수행한다.

하지만 증기우회 제어계통은 정상운전 시 1/2차측 열평형을 유지하는 주 기능을 수행하기 위해 입력 제어신호로 주증기 압력(증기발생기 압력)을 사용하고 설정값이 발전소 상황에 따라 자동으로 변동되도록 설계되어 있으나 원자로 정지 후 RCS 냉각운전 시에는 제어 알고리즘의 부재로 수동 제어를 해야함에 따라 다음과 같은 문제점을 가지고 있다.

첫째, 원자로 정지 후 노심에서 발생하는 잔열의 크기는 정지 직전 노심 상황에 따라 다르게 시간에 따라 변하므로(지수 함수적으로 감소) 예측하기 어렵다.

둘째, RCS 냉각운전 시 운전원의 지속적인 감시가 필요하므로 타 계통을 감시하기 어렵다.

셋째, RCS 과냉에 의한 가압열충격(PTS : Pressurized Thermal Shock)을 유발할 수 있는 잠재적인 위험이 크다.

따라서 이런 문제점을 개선하기 위해 원자로 정지 후 증기우회 제어계통을 통한 2차측 증기방출 제어의 최적 개선방안을 수립하여 설비 신뢰성 확보 및 발전소 안정운영에 기여하고자 본 연구를 시작하게 되었다.

## 제 2 장 원전과 증기우회 제어계통

### 제1절. 증기우회 제어계통 개요

#### 1. 증기우회 제어계통 기능

##### 가. 1차측 잉여 에너지 제거

원자로출력 급감발계통(RPCS) 및 다른 제어계통과 같이 운전되어 터빈 우회밸브를 통해 증기량을 조절함으로써 1차측의 잉여에너지를 자동으로 제거한다.

##### 나. 냉각재 평균온도( $T_{avg}$ ) 수동 제어

발전소 가열 및 냉각 운전시 냉각재 평균온도( $T_{avg}$ )를 수동으로 제어한다.

##### 다. 제어봉 자동인출 금지신호(AWP) 및 자동동작 금지신호(AMI) 발생

- (1) 터빈우회 요구조건이 있을 경우에는 언제나 제어봉이 자동적으로 인출되지 않도록 제어봉 자동인출 금지신호를 제어봉 구동장치 제어계통으로 보낸다.
- (2) 원자로 출력이 15% 이하일 때 또는 터빈출력이 기 설정된 값 이하로 떨어질 때 제어봉 자동동작 금지신호를 제어봉 구동장치 제어계통으로 보낸다.

#### 2. 증기우회 제어계통 구성

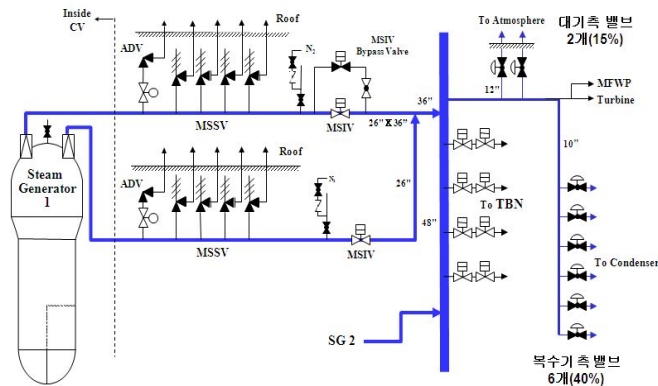


그림 2-1 증기우회 제어계통 계략도

## 가. 주 제어실 설치 기기

### (1) Flat Panel Display (2개)

#### 1) Master Controller(주제어기, 1개)

주제어기에 입력된 설정값과 실측값을 비교하여 편차에 비례하는 요구신호를 발생시킨 후 개별전송기에 전달

#### 2) Valve M/A Controller (개별제어기, 8개)

주제어기에서 전달된 요구신호에 비례하는 출력신호를 발생시켜 해당 터빈 우회밸브에 전달

#### 3) AMI Set Point Controller

AMI 설정값을 운전원이 수동으로 입력

#### 4) Emergency Off Switch (2개)

터빈 우회밸브로 전달되는 모든 출력신호를 제거함으로써 개방된 터빈 우회밸브를 닫음

#### 5) Emergency Off Reset Switch (1개)

Emergency Off Switch에 의해 발생된 터빈 우회밸브 닫힘신호를 Reset하여 밸브 상태를 정상화시킴



그림 2-2 Flat Panel Display

### (2) Valve Permissive Switch (8개)

#### 1) 운전모드를 선택 : Manual, Auto, Off

2) 'Manual Mode' 에서는 주제어기에서 전달된 요구신호와 무관하게 밸브 허용신호를 발생하여 2차측 증기 압력이 낮은 가열 및 냉각 운전시 터빈 우회밸브를 수동 동작



(3) Emergency Off/Condenser Interlock Reset Switch (1개)

- 1) Emergency Off Switch에 의해 발생된 터빈 우회밸브 닫힘신호를 Reset하여 밸브 상태를 정상화시킴
- 2) Condenser Interlock 신호 발생 후 Reset시 사용



그림 2-3 증기우회 제어계통 각종 핸드스위치

나. 현장 설치 기기



그림 2-4 증기우회 제어밸브

- (1) 증기우회 제어계통은 6개의 복수기측 우회 제어밸브와 2개의 대기측 우회 제어밸브로 구성
- (2) 증기우회 제어계통의 증기 우회용량은 복수기측 40%, 대기측 15%로 총 55% 증기우회 용량을 감당

표 2-1 증기우회 제어밸브 구성

밸브번호	밸브명	개별제어기	증기방출개소
MS-V1001	증기우회 복수기 덤프밸브	HIC-1001	복수기 A1
MS-V1002		HIC-1002	복수기 A2
MS-V1003		HIC-1003	복수기 B1
MS-V1004		HIC-1004	복수기 B2
MS-V1005		HIC-1005	복수기 C1
MS-V1006		HIC-1006	복수기 C2
MS-V1007	증기우회 대기 덤프밸브	HIC-1007	대기
MS-V1008		HIC-1008	

## 제 2 절. 증기우회 제어계통 제어

### 1. 제어 신호

#### 가. 조절모드(Modulation Mode)

조절모드는 비교적 작은 과도상태에서 주증기 압력을 계속 감시하다가 압력이 과도하게 증가되면 프로그램된 설정값에 일치하게 주증기 압력을 조절하기 위해 터빈 우회밸브를 순차적으로 개방하여 증기를 복수기 및 대기로 흘러 보낸다.

단일 부품고장 개념에 의해서 하나의 증기 우회밸브가 열리기 위해서는 독립된 2개의 요구신호 즉 주(Demand)신호와 허용(Permissive)신호가 필요하다.

2개의 주증기 압력이 따로 만들어져서 하나는 밸브 제어신호를 만드는 주 조절 제어 채널로, 다른 하나는 밸브 허용신호를 만드는 허용 조절제어 채널로 가게 된다.

#### (1) 주증기 압력 설정값

주증기 압력 설정값은 증기발생기 유량신호와 가압기 압력신호를 이용하여 요구신호 회로와 허용신호 회로에서 2개의 설정값이 만들어지며 주증기 압력이 설정값을 초과하면 증기우회 요구신호가 발생된다.

증기발생기 유량신호를 이용한 설정값 프로그램은 원자로출력에 따른 증기 압력의 함수로서 원자로 출력이 증가하면 증기압력은 감소되도록 프로그램 되어 있다.

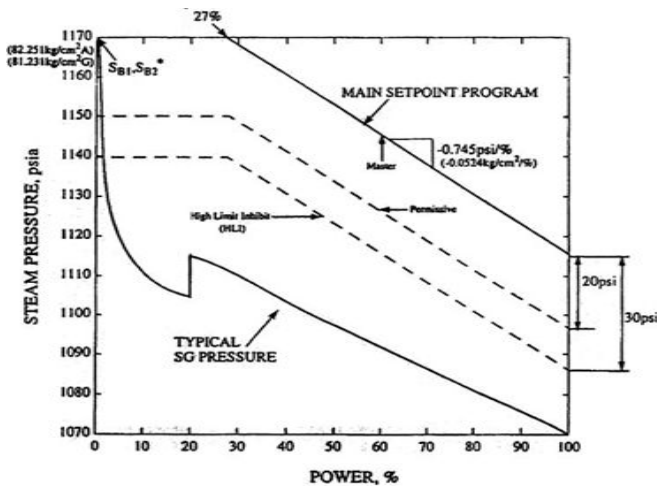


그림 2-5 원자로 출력에 따른 주증기 압력

또한 이 설정값은 정상운전 시의 주증기 압력곡선과 어느 정도 압력 차이를 유지하게끔 설정되며 증기 압력의 조그만 변화에 밸브가 자주 열리지 않을 정도로 크고 증기 우회 요구시 응답이 잘될 수 있도록 적절히 작은 압력차를 설정해 준다.

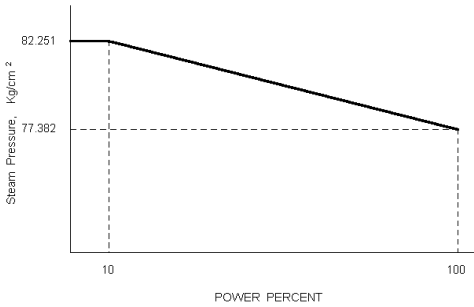


그림 2-6 조절모드 설정값 프로그램

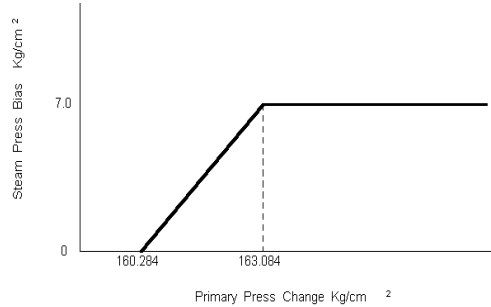


그림 2-7 가압기 압력에 따른 설정값 프로그램

가압기 압력신호를 이용한 설정값 프로그램은 냉각재계통에서 생기는 과도상태를 미리 예측하여 빠르게 응답하기 위하여 증기발생기 유량신호를 이용한 설정값 프로그램과 합산할 때 부(-)의 바이어스를 제공한다.

즉 가압기 압력이 올라가면 주증기 압력 설정값은 내려가도록 프로그램 되어있다.

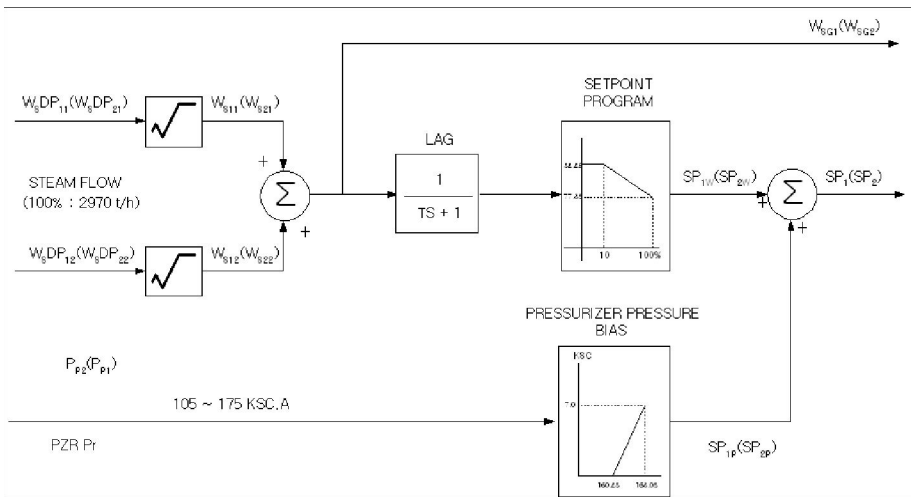


그림 2-8 주증기 모관압력 설정값 프로그램

(2) 밸브 요구신호

측정된 주증기 압력은 요구신호 회로와 허용신호 회로에 제공되고 각각의 주 제어기는 주증기 설정값과 비교하여 편차신호를 발생시키는데 이 편차신호가 바로 증기우회 요구값이 된다.

(3) 밸브 요구 프로그래밍

주제어기의 출력이 증기우회 요구신호인데 각기 다른 5개의 밸브 프로그램으로 입력된다.

이것은 증기 우회밸브를 요구량에 따라 연속적으로 조절하게 되어있어 밸브 프로그램 1의 출력은 1번 밸브를, 밸브 프로그램 2의 출력은 2번 밸브를, 밸브 프로그램 3의 출력은 3, 4번 밸브를, 밸브 프로그램 4의 출력은 5, 6번 밸브를, 밸브 프로그램 5의 출력은 7, 8번 밸브를 각각 조절한다.

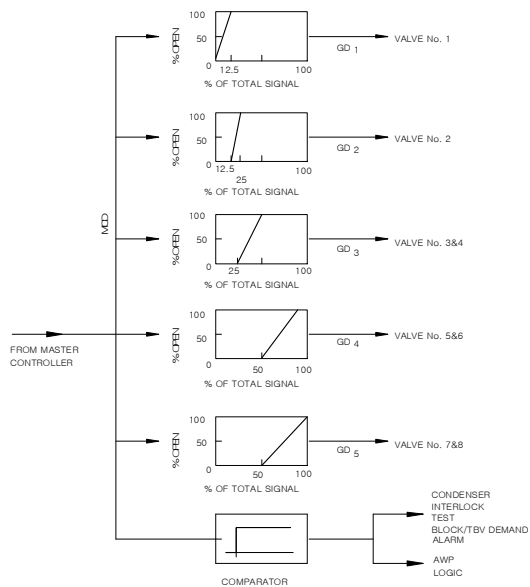


그림 2-9 증기 우회밸브 제어 프로그램

(4) 밸브 허용 요구신호

밸브 허용 요구신호가 터빈 우회밸브를 제어하는데 있어서 밸브 주 제어 요구신호와 같이 사용되는데 이는 단일부품 고장개념에서 비롯된 것이다.

허용신호는 밸브조절 요구신호보다 먼저 발생되고 또한 나중까지 남아있게 되는데 이는 허용신호에  $\Delta P(1.4\text{kg/cm}^2)$ 의 입력이 인가되어 설정값이 이만큼 낮아지는 것이다.

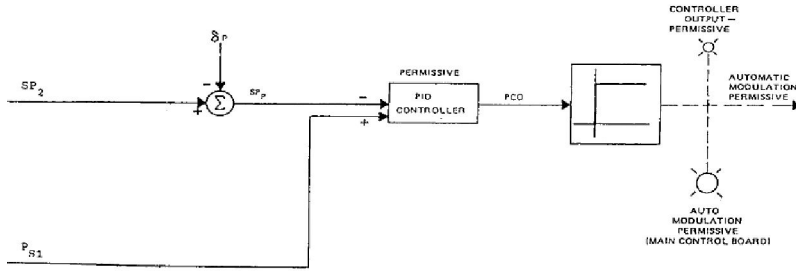


그림 2-10 밸브 허용 요구신호

### 나. 급속개방 모드(Quick Open Mode)

급속열림(Quick Open) 기능은 조절모드(Modulation Mode)에 비해 상대적으로 큰 과도상태일 때 쓰이게 되는데 이때는 조절요구를 차단(Override)하고 1초 이내에 밸브를 열리게 한다.

#### (1) 급속열림(Quick Open) 요구신호

급속열림(Quick Open) 회로는  $X_1, X_2, Y_1, Y_2$ 의 4가지 요구신호가 있는데  $X_1, X_2$ 는 우회밸브 1~4를  $Y_1, Y_2$ 는 터빈 우회밸브 5~8를 각각 열도록 되어 있다.

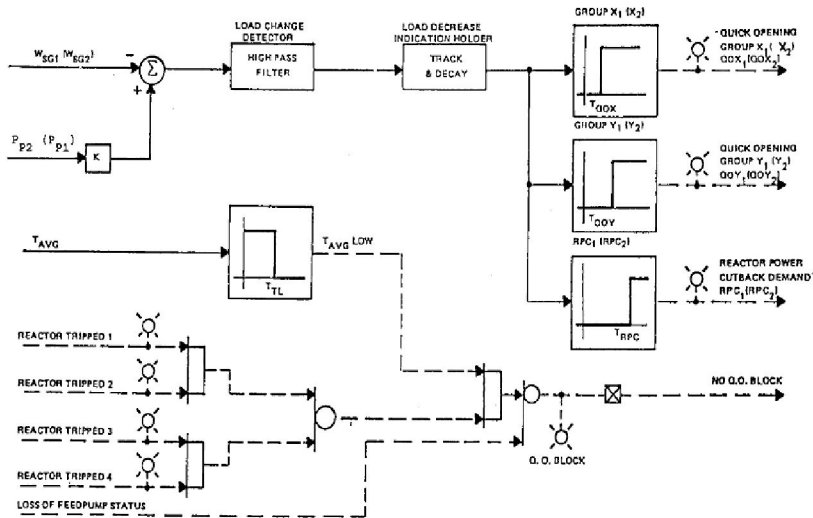


그림 2-11 급속열림 채널

또한 증기발생기 2의 증기유량 회로에서 급속열림(Quick Open)  $X_2, Y_2$  신호가 발생되는데 합산기(Summer)에서 가압기 압력신호가 마주친다.

여기서 가압기 압력이 크게 증가하면 급속열림 신호가 올라가고 가압기 압력이 크게 감소하면 급속열림 신호가 내려가는 바이어스 신호가 만들어진다.

그 후 하이패스 필터(High Pass Filter), 트랙(Track)과 디케이(Decay)를 지난 신호는 비교기 3개로 가는데 각각 급속열림  $X_1(X_2)$  그룹요구, 급속열림  $Y_1(Y_2)$  그룹요구, 원자로 출력감발 요구 등이다.

1) High Path Filter(Load Change Detector)

- 방정식 :  $Output = \left( \frac{\tau_1 s}{1 + \tau_2 s} \right) Input \quad (\tau_1 = \tau_2)$

- 입력신호의 변화가 없으면 출력신호는 제로이며 입력신호의 변화율에 비례하는 출력신호를 발생한다.

2) PZR Pr Bias(K)

- 1차측의 상태에 따라서 급속개방 신호 발생을 조절하기 위해 사용
- 가압기 압력 증가시 급속개방 출력신호를 배가(Enhance)시키고 가압기 압력 감소시 급속개방 출력신호를 감소(Attenuate)시킨다.

3) Track & Decay(Load Decrease Indication Holder)

- 급속열림 신호를 일정한 시간동안 유지하기 위해서 High Pass Filter 출력신호가 최고값에서부터 천천히 떨어지도록 설정한다.
- 이 신호를 입력신호와 비교하여 큰 값을 출력신호로 내보내어 과도상태 발생시 최적의 응답을 할 수 있다.

(2) 급속열림(Quick Open) 방지회로

급속열림 신호가 존재하더라도 증기 우회밸브가 열리지 않은 경우는 아래와 같다.

1) 원자로가 트립된 직후에 냉각재 평균온도( $T_{avg}$ )가 낮을 때

이 경우에는 출력이 낮은 상태에서 일어나기 쉬운데 1차측이 열을 충분히 흡수할 수 있는 용량을 갖고 있으며 밸브를 빨리 움직일 경우 영출력으로 안정되기가 어려워지기 때문이다.

2) 급수펌프가 1대 상실된 직후

당시 출력이 75% 이상이였다면 원자로출력 급감발계통이 동작되어 원자로는 물론 터빈출력까지 감소되어 원자로 냉각재가 과냉각되는 것을 방지해주기 때문이다.

## 2. 연동신호

### 가. 복수기 연동신호

복수기가 우회 증기유량을 받을 조건이 되지 않을 경우 터빈 우회밸브를 열리지 못하게 하여 터빈과 복수기를 보호하는 데 있다.

또한 주제어실과 유지보수 판넬에 비상정지 스위치가 있어서 터빈 우회밸브로 가는 모든 신호를 차단하는데 수동으로 운전원이 조작하게 되어 있다.

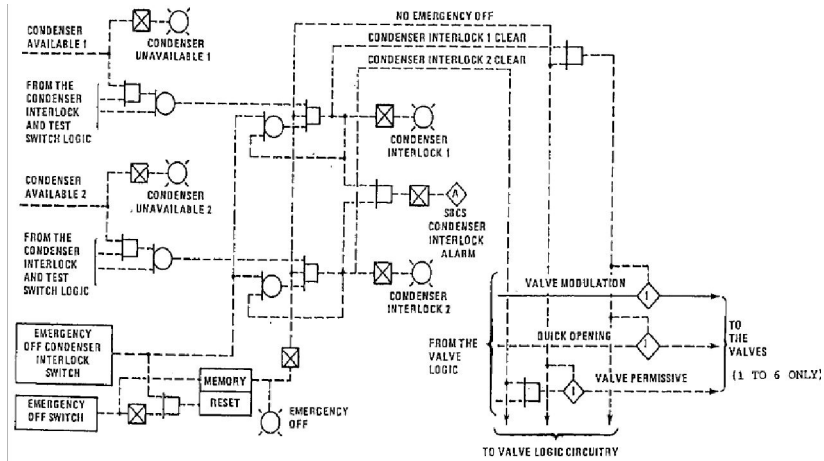


그림 2-12 복수기 연동신호 및 Emergency Off 회로

### 나. 자동 인출금지(Auto Withdrawal Prohibit)

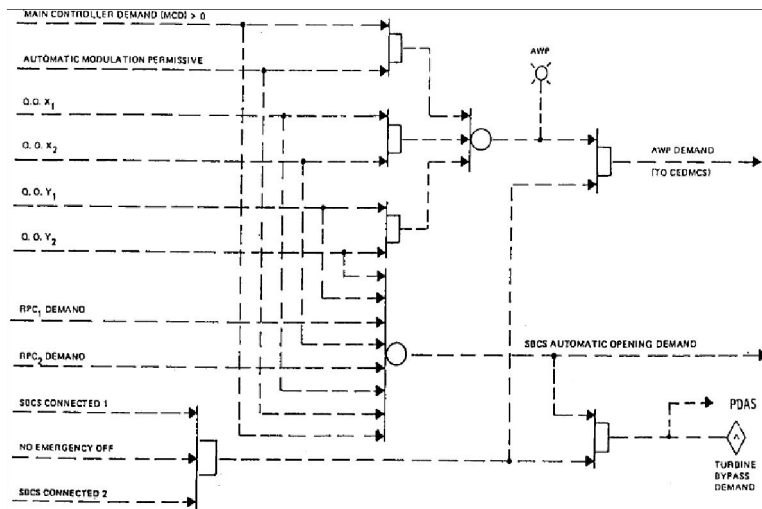


그림 2-13 AWP 신호발생 회로



터빈 우회밸브가 자동으로 개방되는 요구조건이 있다는 것은 1차계통의 에너지가 과도하다는 증거이므로 원자로 출력을 증가시키지 않기 위해 자동인출 금지 신호(AWP)를 제어봉 구동장치 제어계통(CEDMCS)으로 보내 원자로 제어계통(RRS) 요구신호 응답으로서 제어봉 인출을 차단하여 원자로 출력 상승을 방지해 준다.

#### 다. 자동 동작금지(Auto Motion Inhibit)

증기우회 제어계통에는 자동동작금지(AMI)라는 회로가 있어서 발전소를 신뢰성 있게, 운전할 수 있도록 되어 있다.

터빈부하가 자동동작 금지(AMI)허용 설정값보다 떨어졌을 때 제어봉 자동제어를 금지하는 어떤 원자로 출력준위를 운전원이 설정할 수 있다.

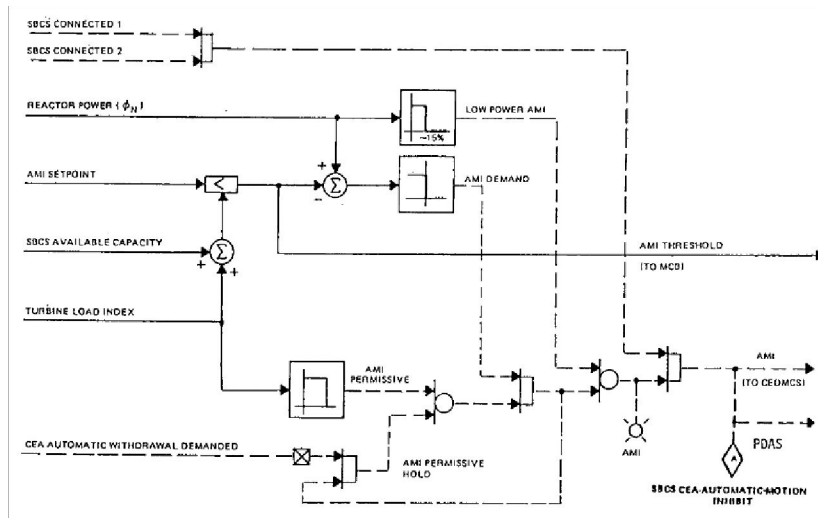


그림 2-14 AMI 신호발생 회로

그러나 원자로 출력이 터빈 우회밸브의 용량보다 더 클 때는 제어봉 동작이 자동으로 차단되는 것을 방지해야 하기 때문에 자동동작 금지 설정값(AMI)은 밸브 용량에 제한을 받는다.

이것이 바로 자동동작 금지 문턱값인데 수동 설정값과 2차계통 용량 중 적은 값이 선택되어 이 값보다 원자로출력이 낮을 때에 자동동작 금지신호가 발생된다. 한편, 자동동작 금지신호는 원자로 제어계통(RRS) 자동운전의 범위인 원자로 출력 15% 미만에서는 항상 발생하게 되어 있다.

자동동작 금지회로의 1차적인 목적은 일시적인 문제로 터빈이 트립되거나 소내 부하까지 감발되어 빠른 시간 내에 복구될 수 있는 상황에서 원자로출력을 자동적으로 계속 유지하는데 있다.

아래 그림은 증기우회 제어계통의 제어 및 연동신호를 종합한 기능선도이다.

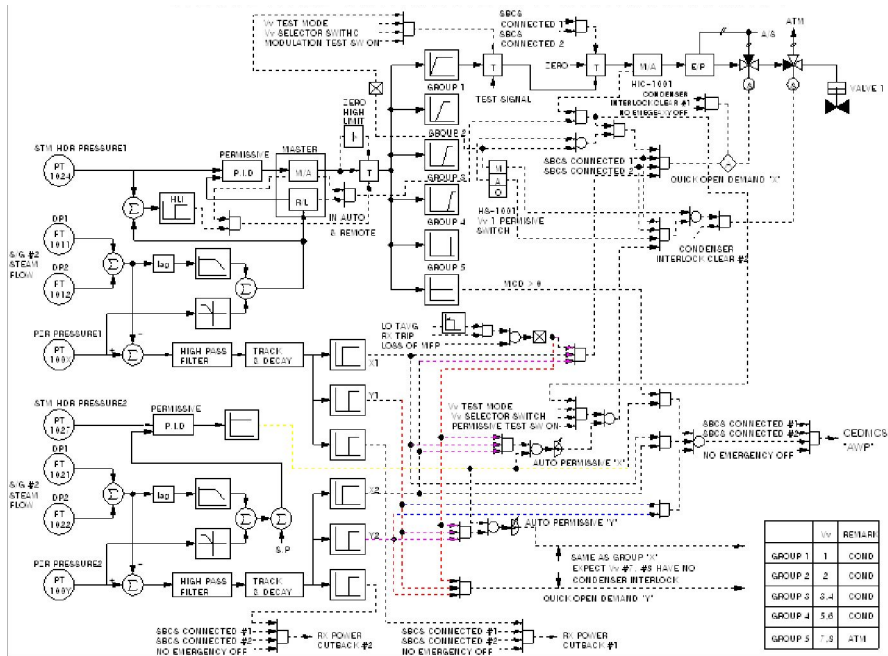


그림 2-15 증기우회 제어계통 기능선도

## 제 3 절. 원자로 정지 후 RCS 냉각

앞 절에서는 증기우회 제어계통에 대한 전반적인 개요와 정상 출력운전시 자동제어에 대해 알아보았다.

하지만 증기우회 제어계통은 원자로 정지 후 RCS를 냉각하고자 할 때에 자동제어 수단을 제공하지 않는다.

따라서 운전원은 증기우회 제어계통을 수동으로 제어하여 원자로에서 발생하는 잔열(Residual Heat)과 원자로 냉각재펌프(RCP : Reactor Coolant Pump)에서 발생하는 유동마찰열을 적절히 제거함으로써 이를 달성할 수 있다.

이 절에서는 증기우회 제어계통을 수동으로 제어하여 RCS를 냉각하는 절차 및 RCS 수동 냉각시 발전소 주요 변수들의 변화에 대해 알아보하고자 한다.

### 1. RCS 냉각 절차

#### 가. 증기우회 제어밸브 개별제어기 수동 제어

증기우회 제어밸브 개별제어기를 수동으로 조작하여 밸브 개도를 조절함으로써 RCS 온도를 제어한다.

- (1) 증기우회 제어밸브 중 하나를 선택하여 해당 제어밸브 핸드스위치를 "Manual Permissive"로 놓는다.
- (2) 해당 제어밸브 개별제어기를 "Manual" 상태에서 밸브 개도를 조절함으로써 RCS 가열률 및 냉각률을 제어한다.

#### 나. 증기우회 제어밸브 주제어기 수동 제어

증기우회 제어계통 주제어기를 수동으로 조작하여 밸브 개도를 조절함으로써 RCS 온도를 제어한다.

- (1) 증기우회 제어밸브 주제어기의 운전모드는 "Local/Auto" 모드로 선택해서 사용한다.
- (2) "Local/Auto" 모드 사용 전에 부적절한 밸브의 개방을 방지하기 위해 운전원 설정치(OSP) 값이 주증기 압력보다 높음을 확인한다.
- (3) 증기우회 제어밸브 핸드스위치 중 임의의 한 개를 "Manual Permissive" 상태로

- 놓고 해당 증기우회 제어밸브 개별제어기를 "Auto" 상태로 놓는다.
- (4) 더 많은 열 제거가 필요하다면, 다른 증기우회 제어밸브 핸드스위치를 "Manual Permissive" 상태로 놓고 해당 증기우회 제어밸브 개별제어기를 "Auto" 상태로 놓는다.
  - (5) 증기우회 제어밸브 주제어기를 "Local/Auto" 상태나 "Manual" 상태로 놓는다.
  - (6) 증기우회 제어밸브 주제어기 "Local/Auto"인 경우 운전원 설정치(OSP)를 조절하고, "Manual" 상태인 경우에도 증기우회 제어밸브 주제어기의 요구신호를 조절하여 증기우회 제어밸브 개도를 제어한다.

## 2. 원자로 정지 후 RCS 수동 냉각

다음은 시뮬레이터를 이용하여, 증기우회 제어계통을 통한 RCS 수동 냉각시 시간대별 주요 운전변수를 나타낸 그래프이다.

냉각방법으로는 원자력발전소에서 자주 사용하는 증기우회 제어밸브 개별제어기 수동 제어를 사용하였다.

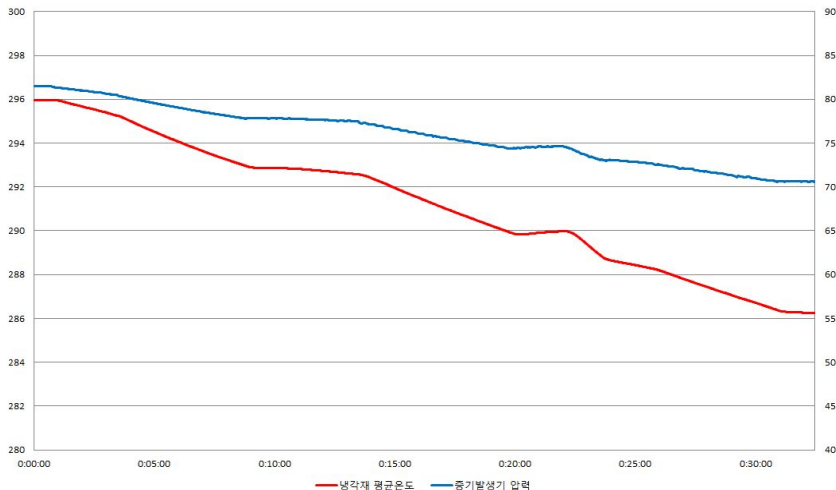


그림 2-16 RCS 수동냉각시 냉각재 평균온도 및 증기발생기 압력

그림 2-16에서 보듯이 증기우회 제어계통을 통한 RCS 수동 냉각시, RCS 냉각률이 전반적으로 선형적이지 못하며 일부 구간에서는 RCS 과냉의 위험이 존재한다. 또한 증기발생기 압력도 RCS 온도에 대한 포화압력을 지시하며 같이 응동하는 것을 볼 수 있다

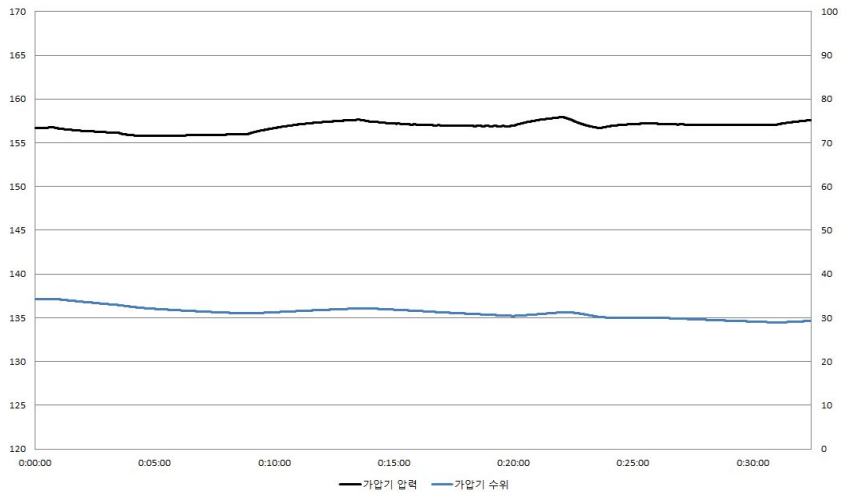


그림 2-17 RCS 수동냉각시 가압기 압력 및 수위

하지만 그림 2-17에서 나타나듯이 가압기 압력과 수위는 해당 제어기에 의해 정상범위 내에서 조절됨을 볼 수 있다.

## 제 3 장 RCS 수동 냉각시 문제점 도출

### 제 1 절 수동제어의 어려움 존재

#### 1. RCS 냉각률 비선형성

앞서 설명했듯이 원자로 정지 후 RCS 냉각운전은 증기우회 제어계통을 수동으로 제어해야 하기 때문에 그림 2-16에서 보듯이 시간대별 RCS 냉각률이 선형적이지 못하다

이는 원자로 정지 후 발생하는 잔열 크기에 대한 예측이 어렵고 원자로 정지 직후의 증기관 배수밸브들의 응동상태 등의 변수에 따라 증기우회 제어밸브 개도 조절이 다를 수 있기 때문이다.

#### 가. 잔열(Residual Heat)

표 3-1 핵분열 후 방출되는 에너지

핵분열 직후에 방출되는 에너지	MeV
핵분열 단편의 운동에너지	165
중성자 운동에너지	5
$\gamma$ -선의 에너지	7
(n, $\gamma$ ) 반응에 의해서 방출되는 $\gamma$ -선의 에너지	7
핵분열 단편이 붕괴하면서 방출되는 에너지	MeV
$\beta$ -입자의 에너지	7
$\gamma$ -선의 에너지	6
(n, $\gamma$ ) 반응에 의한 에너지	2
총 에너지	약 200 MeV

원자로 출력이 100%에서 0%로 정지되면 원자로 내의 중성자 연쇄반응은 거의 멈춘다.

그러나 출력운전 중에 생성되어 핵연료 내에 축적되어 있는 핵분열 생성물들은

계속 붕괴한다.

핵분열 생성물이  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  혹은 다른 방사선을 내면 그 방사선들이 연료나 노심 구조물에 흡수되어 열을 발생한다.

이처럼 원자로 정지 후에 생성되는 열을 붕괴열(Decay Heat) 또는 잔열(Residual Heat)이라 한다.

## 나. 노심 내 생성되는 잔열(Residual Heat) 크기

표 3-2 원자로 정지 후 방출되는 붕괴열

정지후 경과시간	% 분율(100%에 대한)
1 sec	6.0
1 min	4.5
30 hr	2.0
1 hr	1.6
8 hr	1.0
24 hr	0.7
48 hr	0.6

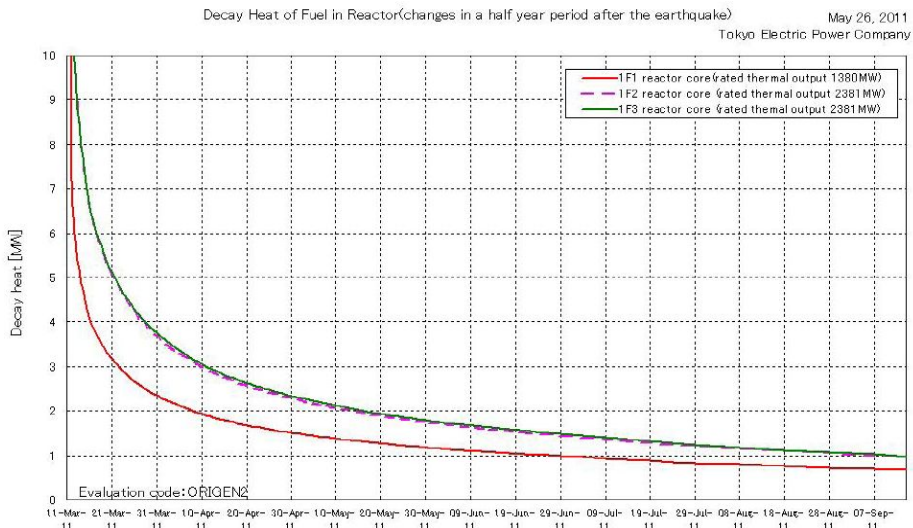


그림 3-1 후쿠시마 사고 후 발전소별 잔열 그래프

그림 3-1에서 보는 바와 같이 노심에서 발생하는 잔열은 원자로 정지 직전 출력준위 및 원자로 운전시간 그리고 정지 후 경과시간에 따라 발생하는 크기가 다르고 시간의 경과에 따라 지수 함수적으로 감소한다.

## 2. 운전 여유도 감소

앞서 그림 3-1에서 보는 바와 같이 노심에서 발생하는 잔열의 크기는 시간에 따라 지속적으로 감소하고 또한 터빈 증기관 배수밸브들의 응동상태 등이 달라질 수 있으므로 터빈 우회밸브 개도를 지속적으로 조절하지 않으면 RCS 온도를 원하는 목표값으로 제어하기 어렵다.

따라서 RCS 냉각운전 시 이를 제어하는 인원의 지속적인 계통 감시가 필수적이며 이에 따라 상대적으로 다른 계통에 대한 감시 및 제어가 소홀해질 수밖에 없다.



## 제 2 절 가압 열충격 유발 위험 내재

원자력 발전소에서는 원자로 냉각재계통 보호를 위해 냉각률 제한치를 두고 있으나 만일 RCS 냉각운전 시 제어가 미흡했을 경우 RCS 과냉각에 의한 가압 열충격(PTS : Pressurized Thermal Shock)을 유발할 수 있는 잠재적인 위험을 항상 안고 있다.

### 1. 가압 열충격

가압 열충격(PTS : Pressurized Thermal Shock)이란 압력용기의 벽면 온도가 기준 무연성 천이온도( $RT_{NDT}$  : Nil-Ductility Transition Temperature)보다 저하되어 재료의 파괴인성치가 급격히 감소하는 현상을 말하며 다음과 같은 상황에서 발생할 가능성이 있다.

첫째, 발전소 정지시에 냉각률 조절 및 원자로 냉각재 상실사고(LOCA : Loss of Coolant Accident)로 인한 안전주입계통의 기동과 같은 원자로 냉각재계통(RCS : Reactor Coolant System) 돌발 현상들을 제어하지 못할 때  
 둘째, 높은 압력과 급격한 온도 변화에 기인하며 중성자 조사로 인한 용기 재료의 취화, 용기의 내벽 또는 근처의 균열과 같은 결함의 존재시  
 특히 중성자 조사는 내부 표면 근처의 파괴인성을 크게 감소시킴과 동시에 냉각시 상대적으로 높은 인장응력을 유발하여 파괴에 지배적인 영향을 미친다.

### 2. 무연성 천이온도( $RT_{NDT}$ : Reference Temp. Nil Ductility Transition)

재료가 연성에서 취성으로 천이하는 온도 즉, A 지역과 B 지역의 경계부 온도 + 안전을 고려한 여유온도이다.

다른 말로는 NDT 이하에서 운전하면 파괴 우려가 있으므로 여유 온도를 고려해서 그 이하에서는 운전하지 않도록 하는 기준점을 ‘무연성 천이온도’라 한다.

$$\therefore RT_{NDT} = NDT + 60^{\circ}\text{F}$$

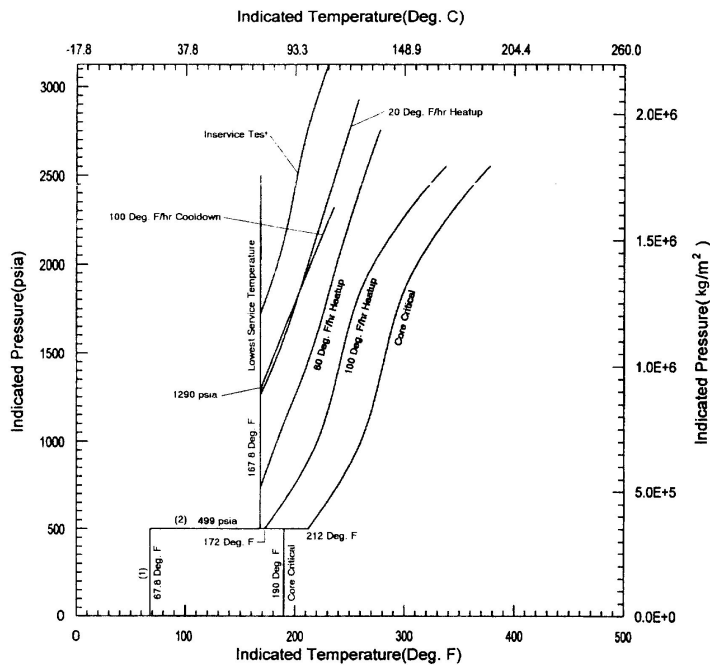
$RT_{NDT}$ 는 온도에 따라 변하는 것 외에 노심의 수명이 증가하면서 1 Mev 이상의 속중성자 조사에 의해 금속의 재질이 변하게 된다.

$RT_{NDT}$ 의 값은 용접부의 구리(Cu) 함유량에 따라 상당한 차이가 있는데 즉 Cu 함

유량이 많으면  $RT_{NDT}$  가 높으며 운전 허용온도 범위가 적다는 의미이다.

원자로 용기는 몇 부분의 탄소강으로 서로 용접이 되어 제작되므로 용접시 구리 (Cu)의 함유는 필연적이고 Cu의 함유량을 감소시키는데 기술적 접근을 해야 한다. 또한 중성자 조사의 증가가  $RT_{NDT}$  값을 증가시키는 원인이므로 LLLP(Low Leakage Loading Pattern)형식으로 핵연료 장전을 함으로서 중성자 누설을 감소시키고 원자로용기에 금속재질 변화를 줄임으로서  $RT_{NDT}$ 의 증가를 완화시킬 수 있다.

### 3. 원자력 발전소에서의 냉각를 제한



- (1) Minimum Boltup Temperature (67.8 °F)
- (2) Maximum Allowable Pressure Below Lowest Service Temperature (499 psia)
- (3) Lowest Service Temperature (167.8 °F)

그림 3-2 전출력에서의 RCS 압력/온도 제한곡선

그림 3-2 RCS 압력/온도 제한곡선은 100 °F/hr (55.6 °C/hr)까지의 가열 및 냉각률에 따라 원자로 용기 내벽 및 외벽을 모두 고려하여 가장 제한적인(보수적인) 경우를 결정하여 작성된 합성 곡선이다.

## 제 4 장 증기우회 제어계통 개선방안

앞 장에서 기술한 바와 같이 원자로 정지 후 RCS 온도를 수동으로 제어하는데 여러가지 문제점이 도출된 바, 이번 장에서는 원자로 정지 후 증기우회 제어계통을 이용한 RCS 냉각 개선방안 2가지를 제시하고자 한다.

그에 앞서 이해를 돕기 위해 RCS 및 2차측 급수의 구성물질인 물의 포화온도 및 압력 특성에 대해 알아보자

### 제 1 절 물의 포화온도 및 압력 특성

#### 1. 포화증기 표

물은 대기압 상태에서 외부로부터 열을 받으면 점점 가열되어 100 ℃에서 비등이 발생한다.

물의 비등점은 가압이 될수록 점점 상승하게 되는데 이는 다른 유체와 동일하다.

표 4-1 포화증기표

계기압력 (kg/cm <sup>2</sup> G)	절대압력 (kg/cm <sup>2</sup> A)	포화온도 (℃)	비 용 적 (m <sup>3</sup> /kg)	현 열 량 (kcal/kg)	잠 열 량 (kcal/kg)	전 열 (kcal/kg)
	0.05	32.55	28.7184	32.560	579.12	611.68
0.0	1.03323	100.00	1.67300	100.092	539.06	639.15
10.0	11.033	183.33	0.180218	185.793	477.98	663.77
20.0	21.033	213.94	0.096575	218.725	218.725	668.25
30.0	31.033	234.64	0.065675	241.740	241.740	669.32
40.0	41.033	250.69	0.049445	260.133	260.133	668.83
50.0	51.033	263.97	0.039391	275.809	275.809	667.36
60.0	61.033	275.39	0.0325247	289.688	375.54	665.22
70.0	71.033	285.46	0.0275230	302.298	360.23	662.53
80.0	81.033	294.5	0.0237075	313.970	345.40	659.38
90.0	91.033	302.73	0.0206941	324.932	330.88	655.82
100.0	101.033	310.26	0.0182654	335.332	316.54	651.87

비등점에 도달한 물이 외부로부터 계속해서 열을 받게 되면 일정 구간의 잠열구간을 거쳐 과열증기 영역으로 진행하게 되는데 잠열구간에서는 건도가 점점 상승하게 된다.

이 잠열구간은 물의 가압상태에 따라 구간의 크기가 다르게 나타나며 물이 가압될수록 좁아지게 된다.

## 2. 포화증기 곡선

그림 4-1은 증기발생기로 열을 제거하는 구간(약 150~300 °C)에서의 물의 압력 대비 포화온도를 나타낸다.

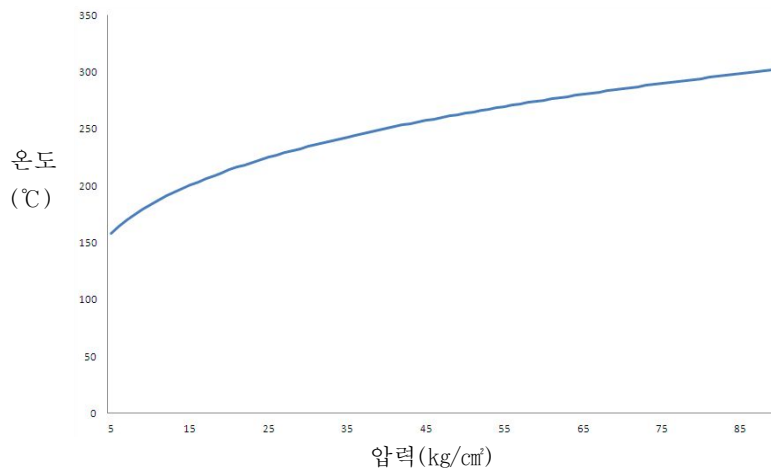


그림 4-1 포화증기 곡선

전체적으로 비선형성을 가지나 일부 구간에서는 압력/온도 그래프가 거의 선형성을 이루고 있어 자동제어의 가능성을 보여준다.

## 제 2 절 주증기 압력신호를 이용한 자동 제어

### 1. 주증기 압력

정상운전 중인 주증기 압력은 그림 4-2에서 보여주듯이 터빈 제어밸브 응답 상태 및 원자로 출력에 따라 변하는 특성을 갖는다.

따라서 주증기 압력(증기발생기 압력)을 제어하는 증기우회 제어계통 자동 설정값도 이에 상응하게 설정되도록 프로그램 되어 있다.

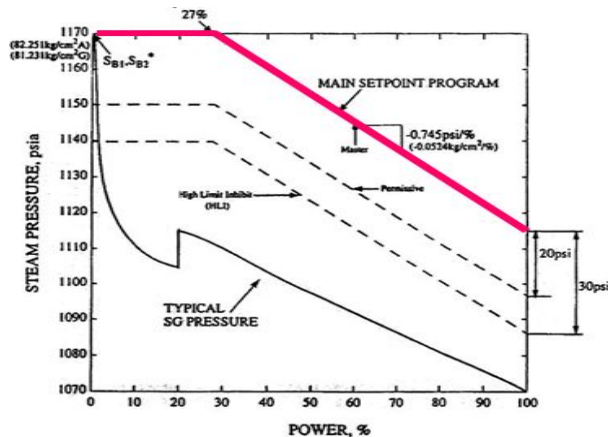


그림 4-2 원자로 출력에 따른 증기우회 제어계통 설정값

하지만 원자로 정지시 증기우회 제어계통 주제어기 설정값은 81.25 kg/cm<sup>2</sup> 으로 일정하게 설정되기 때문에 원자로 정지 후 RCS 온도는 증기우회 제어밸브에 의해 자동으로 제어되어 항상 296 °C 정도를 나타낸다.

이렇듯 RCS 냉각운전시 증기발생기 압력은 과도상태가 진행되지 않는 한 RCS 온도에 대한 포화압력을 나타낸다.

### 2. 자동 제어 방법

정상 출력운전 시 증기우회 제어계통은 원자로출력 변화에 따른 주증기 압력 설정값을 변경함으로써 제어를 수행해 왔다.

이를 개선하여 시간에 따라 주증기 압력 설정값을 변경시키는 제어 알고리즘을 추가하고 설정값과 실제값을 비교하여 발생하는 편차만큼의 밸브 개도 요구값이 발생

되도록 하여 원자로 정지 후 RCS 온도를 자동으로 제어할 수 있도록 하였다.

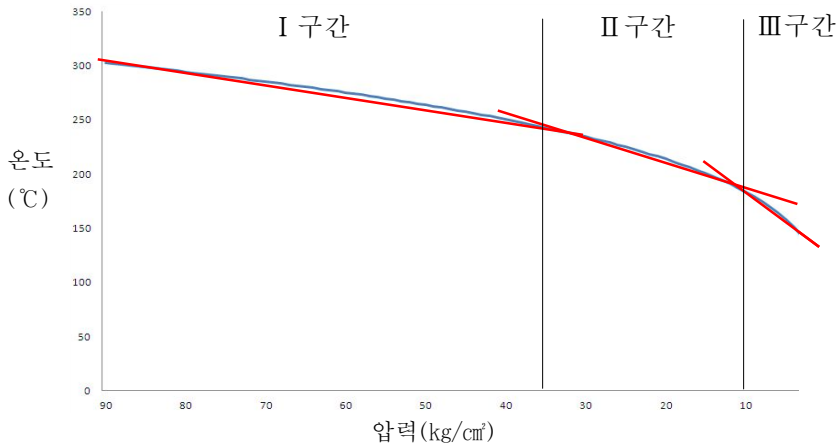


그림 4-3 포화증기 곡선 (증기발생기 냉각구간)

그림 4-3은 그림 4-1 "포화증기 곡선"을 냉각구간에 맞게 재구성한 그림이다.

앞서 설명한 바와 같이 포화증기 곡선은 비선형성을 이루지만 제어를 위해 편의상 3개의 구간으로 나눠서 살펴보기로 한다.

### 가. I 구간

I 구간은 주증기 압력을 기준으로 90~40 kg/cm<sup>2</sup> 까지로 선정하였다.

이 구간에서의 RCS 온도 변화는 포화증기표를 기준으로 302.73~250.69 °C이다.

따라서 I 구간의 포화증기 곡선의 기울기는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\therefore \text{곡선 기울기} = \frac{302.73 - 250.69}{90 - 40} = 1.0408 \text{ [}^\circ\text{C/kg/cm}^2\text{]}$$

따라서 이 구간에서는 1 kg/cm<sup>2</sup>의 압력변화에 약 1.04 °C의 온도 변화가 일어난다.

### 나. II 구간

II 구간은 주증기 압력을 기준으로 40~15 kg/cm<sup>2</sup> 까지로 선정하였다.

이 구간에서의 RCS 온도 변화는 포화증기표를 기준으로 250.69~200.53 °C이다.

따라서 II 구간의 포화증기 곡선의 기울기는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\therefore \text{곡선 기울기} = \frac{250.69 - 200.53}{40 - 15} = 2.0064 \text{ [}^\circ\text{C/kg/cm}^2\text{]}$$

따라서 이 구간에서는 1 kg/cm<sup>2</sup>의 압력변화에 약 2.01 °C의 온도 변화가 일어난다.

### 다. III 구간

III 구간은 주증기 압력을 기준으로 15~3 kg/cm<sup>2</sup> 까지로 선정하였다.

이 구간에서의 RCS 온도 변화는 포화증기표를 기준으로 200.53~143.22 °C이다.

따라서 III 구간의 포화증기 곡선의 기울기는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\therefore \text{곡선 기울기} = \frac{200.53 - 143.22}{15 - 3} = 4.7758 \text{ [}^\circ\text{C/kg/cm}^2\text{]}$$

따라서 이 구간에서는 1 kg/cm<sup>2</sup>의 압력변화에 약 4.78 °C의 온도 변화가 일어난다.

## 3. 시뮬레이터를 이용한 모의시험

### 가. 시험 조건

- (1) 시뮬레이터 모의시험은 시험의 편의성을 위해 그림 4-3 “포화증기 곡선 (증기 발생기 냉각구간)”의 I 구간에서 수행하였으며, RCS 냉각 시작 후 30분간의 데이터를 활용하였다.
- (2) 주증기 압력설정값 변경률은 I ~ III 구간에서의 RCS 최대냉각률(55.6 °C/hr)을 초과하지 않는 범위로 다음과 같이 3가지로 나눠서 진행하였다.
  - 시간당 10 kg/cm<sup>2</sup>씩 감압 제어
  - 시간당 25 kg/cm<sup>2</sup>씩 감압 제어
  - 시간당 50 kg/cm<sup>2</sup>씩 감압 제어
- (3) 모의시험의 정확성을 기하기 위해 RCS 감압운전은 병행해서 수행하지 않았다.
- (4) RCS 초기 조건은 다음과 같다.
  - RCS 온도 : 296 °C
  - RCS 압력 : 158 kg/cm<sup>2</sup> (Auto 상태)
  - 가압기 수위 : 40% (Local/Auto 상태)
- (5) 모의시험 진행 1분 후부터 자동제어 시작

### 나. 시험 결과

- (1) 시간당 10 kg/cm<sup>2</sup>씩 감압 제어

그림 4-4는 시간당 10 kg/cm<sup>2</sup>씩 감압 제어했을 경우, RCS 온도 및 주증기 압력이 선형적으로 제어됨을 보여준다.

더불어 가압기 압력 및 수위 제어도 해당 제어기에 의해 적절히 제어됨을 확인할 수 있다.

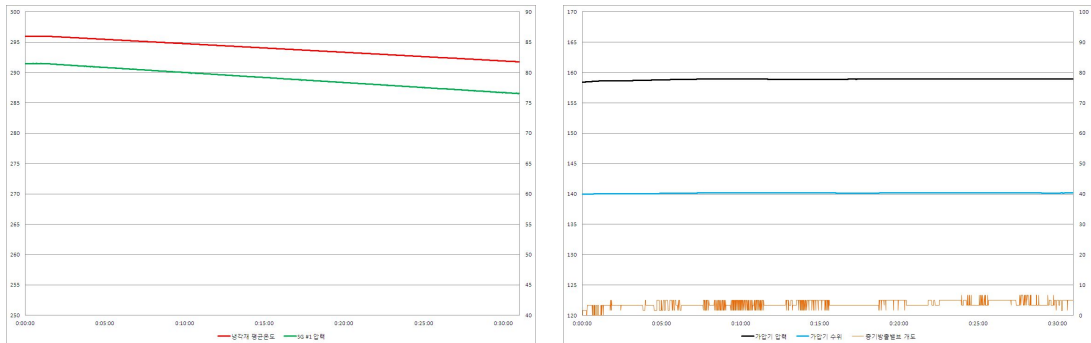


그림 4-4 주증기 압력 변화 그래프 (시간당 10 kg/cm<sup>2</sup>씩 감압 제어)

(2) 시간당 25 kg/cm<sup>2</sup>씩 감압 제어

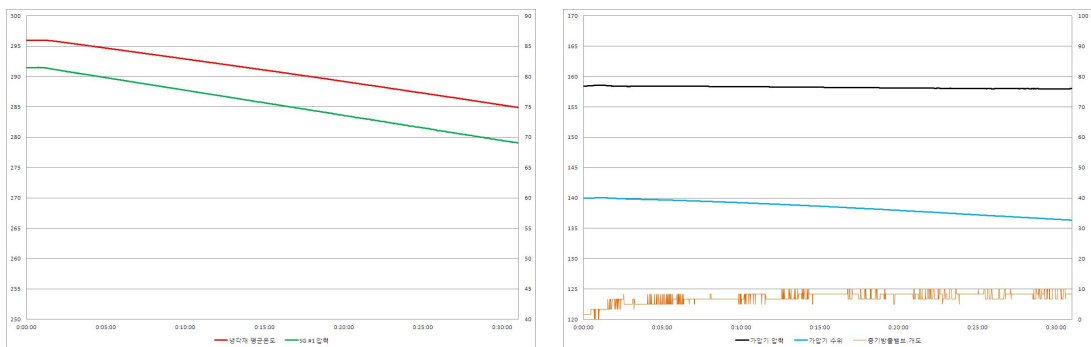


그림 4-5 주증기 압력 변화 그래프 (시간당 25 kg/cm<sup>2</sup>씩 감압 제어)

그림 4-5는 시간당 25 kg/cm<sup>2</sup>씩 감압 제어했을 경우, RCS 온도 및 주증기 압력이 선형적으로 제어됨을 보여준다.

더불어 가압기 압력 및 수위 제어도 해당 제어기에 의해 적절히 제어됨을 확인할 수 있다

(3) 시간당 50 kg/cm<sup>2</sup>씩 감압 제어

그림 4-6은 시간당 50 kg/cm<sup>2</sup>씩 감압 제어했을 경우, RCS 온도 및 주증기 압력이 선형적으로 제어됨을 보여준다.

하지만 가압기 압력 및 수위 제어는 자동제어 영역을 벗어날 우려가 있어 수동 제어를 수행함으로써 적절히 제어됨을 확인할 수 있다



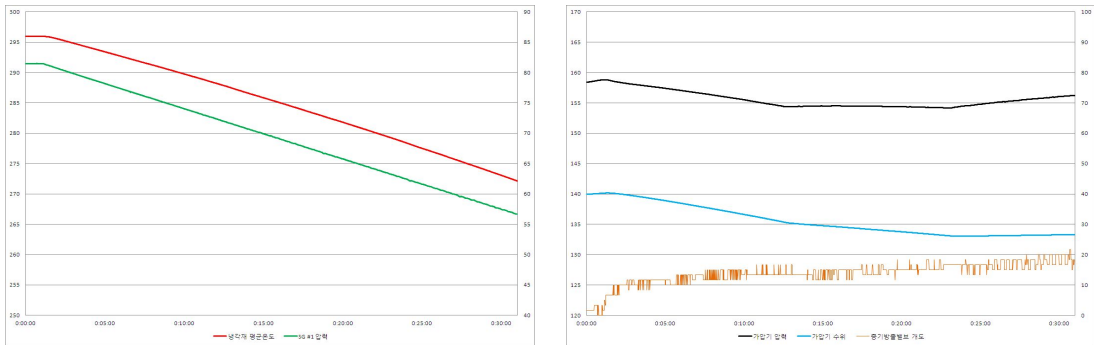


그림 4-6 주증기 압력 변화 그래프 (시간당 50 kg/cm<sup>2</sup>씩 감압 제어)

(4) 시간당 10 kg/cm<sup>2</sup>, 25 kg/cm<sup>2</sup>, 50 kg/cm<sup>2</sup> 감압 제어 비교

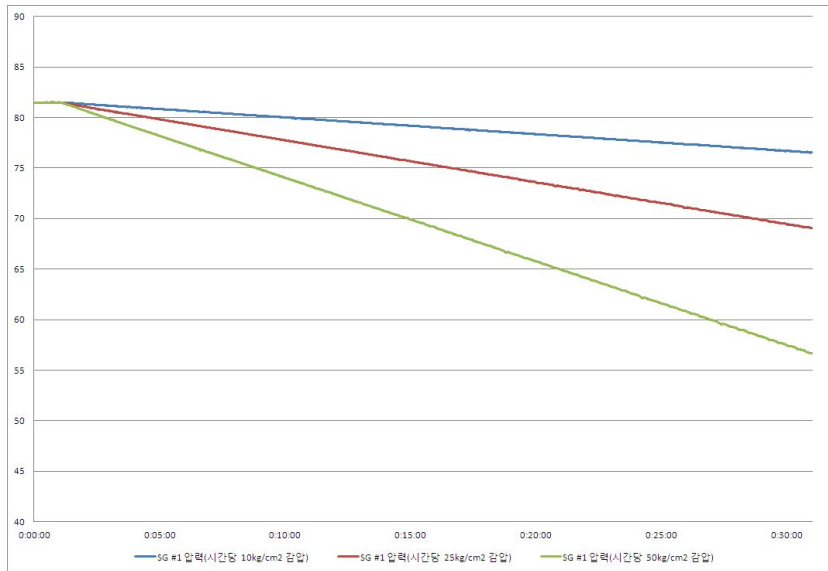


그림 4-7 주증기 압력 변화 그래프 (시간당 10, 25, 50 kg/cm<sup>2</sup>씩 감압 제어)

그림 4-7은 시간당 10, 25, 50 kg/cm<sup>2</sup>씩 감압 제어시 주증기 압력을 비교해 놓은 것이다.

모든 감압률 구간에서 주증기 압력이 선형적으로 제어됨을 보여준다.

### 제 3 절 RCS 온도신호를 이용한 자동 제어

#### 1. RCS 평균온도( $T_{avg}$ )

##### 가. 원자로 제어계통(RRS)

원자로 제어계통(RRS : Reactor Regulating System)은 비안전성 관련 발전소 제어계통으로 터빈 부하변동에 따라 효과적으로 원자로계통을 제어할 수 있도록 설계된 자동제어 계통이다.

이 계통은 제어봉 구동장치 제어계통(CEDMCS)과 더불어 RCS 평균온도( $T_{avg}$ )를 미리 설정된 프로그램에 따라서 제어한다.

정상 출력운전 및 원자로 정지시에도  $T_{avg}$ 는 원자로 출력 제어 및 증기우회 제어계통 등 여러 제어계통에 이용된다.

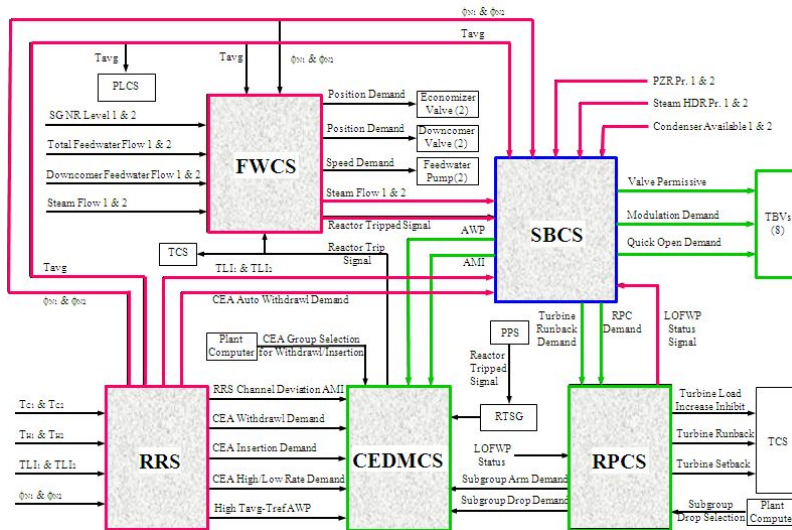


그림 4-8 원자력 발전소 주요 제어계통 연계도

##### 나. 증기우회 제어계통과 RCS 평균온도( $T_{avg}$ )

그림 4-8에서 보듯이 원자로 제어계통은 증기우회 제어계통에  $T_{avg}$ , 원자로 출력, 제어봉(CEA) 자동인출 요구신호 및 터빈 부하신호(TLI)를 제공한다.

원자로 제어계통에서 제공되는  $T_{avg}$ 는 증기우회 제어계통에서 터빈 런백(Runback) 요구신호 및 급속 열림 블록신호를 발생시키는 회로에 사용된다.

이때 RCS 평균온도( $T_{avg}$ )를 제어변수로 이용하여 원자로 정지 후 RCS 온도 제어에도 활용할 수 있을 것이다.

## 2. 자동 제어 방법

이번에는 RCS 평균온도( $T_{avg}$ )를 제어변수로 이용하는 방법에 대해 설명해보기로 한다.

먼저 증기우회 제어계통 주제어기의 설정값을 RCS 평균온도( $T_{avg}$ )로 전환하고 시간에 따라 설정값을 변경시키도록 하는 제어 알고리즘을 추가한다.

그리고 설정값과 실제값을 비교하여 발생하는 편차만큼의 밸브 개도 요구값이 발생되도록 하여 원자로 정지 후 RCS 온도를 자동으로 제어할 수 있도록 하였다.

## 3. 시뮬레이터를 이용한 모의시험

### 가. 시험 조건

- (1) 시뮬레이터 모의시험은 시험의 편의성을 위해 그림 4-3 “포화증기 곡선 (증기 발생기 냉각구간)”의 I 구간에서 수행하였으며, RCS 냉각 시작 후 30분간의 데이터를 활용하였다.
- (2) RCS 온도 설정값 변경률은 RCS 최대냉각률(55.6 °C/hr)을 초과하지 않는 범위로 다음과 같이 3가지로 나눠서 진행하였다.
  - 시간당 10 °C씩 감온 제어
  - 시간당 25 °C씩 감온 제어
  - 시간당 50 °C씩 감온 제어
- (3) 모의시험의 정확성을 기하기 위해 RCS 감압운전은 병행해서 수행하지 않았다.
- (4) RCS 초기 조건은 다음과 같다.
  - RCS 온도 : 296 °C
  - RCS 압력 : 158 kg/cm<sup>2</sup> (Auto 상태)
  - 가압기 수위 : 40% (Local/Auto 상태)
- (5) 모의시험 진행 1분 후부터 자동제어 시작

### 나. 시험 결과

- (1) 시간당 10 °C씩 감온 제어

그림 4-9는 시간당 10 °C씩 감온 제어했을 경우, RCS 온도 및 주증기 압력이 선형적으로 제어됨을 보여준다.

더불어 가압기 압력 및 수위 제어도 해당 제어기에 의해 적절히 제어됨을 확인할 수 있다

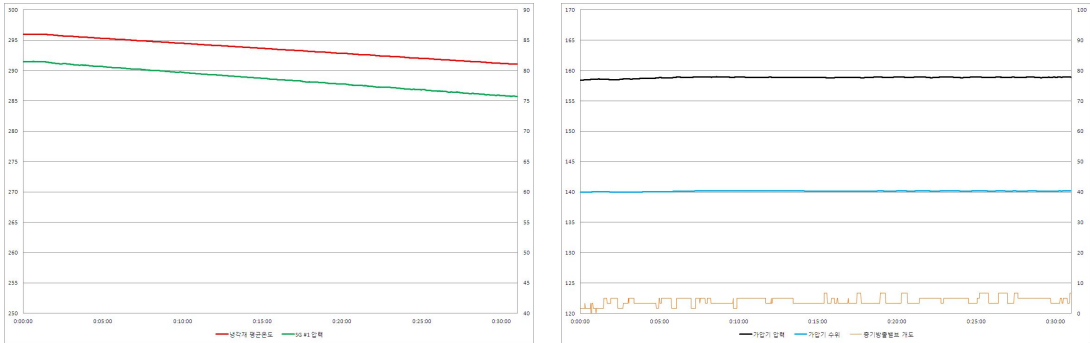


그림 4-9 RCS 온도 변화 그래프 (시간당 10 °C씩 감온 제어)

(2) 시간당 30 °C씩 감온 제어

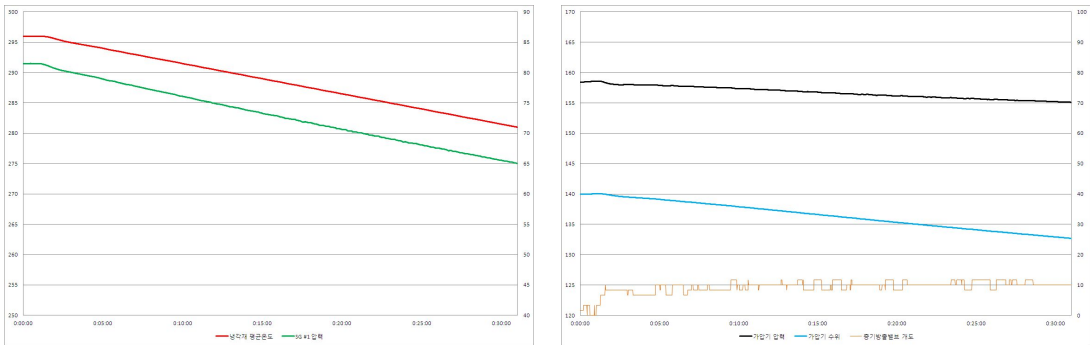


그림 4-10 RCS 온도 변화 그래프 (시간당 30 °C씩 감온 제어)

그림 4-10은 시간당 30 °C씩 감온 제어했을 경우, RCS 온도 및 주증기 압력이 선형적으로 제어됨을 보여준다.

더불어 가압기 압력 및 수위 제어도 해당 제어기에 의해 적절히 제어됨을 확인할 수 있다

(3) 시간당 50 °C씩 감온 제어

그림 4-11은 시간당 50 °C씩 감온 제어했을 경우, RCS 온도 및 주증기 압력이 선형적으로 제어됨을 보여준다.

하지만 가압기 압력 및 수위 제어는 자동제어 영역을 벗어날 우려가 있어 수동 제어를 수행함으로써 적절히 제어됨을 확인할 수 있다

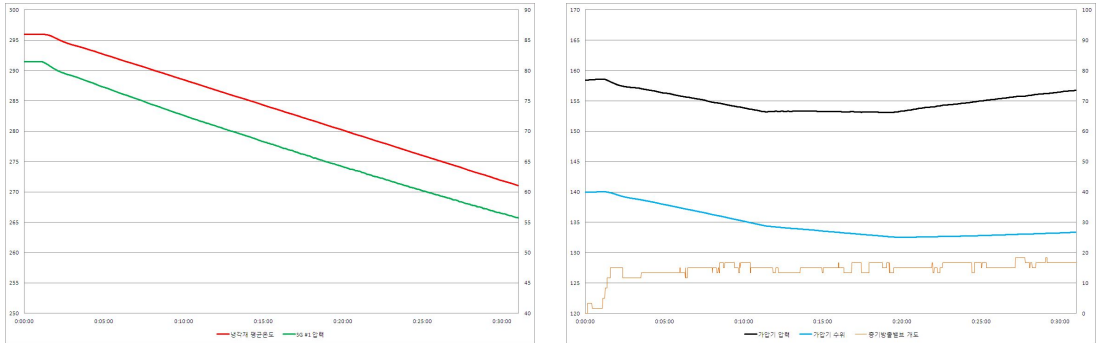


그림 4-11 RCS 온도 변화 그래프 (시간당 50 °C씩 감온 제어)

(4) 시간당 10 °C, 30 °C, 50 °C 감온 제어 비교

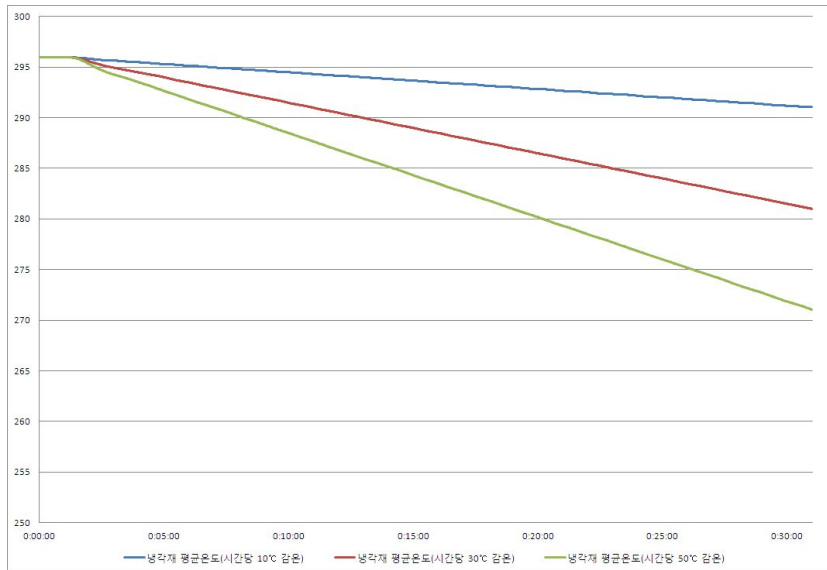


그림 4-12 RCS 온도 변화 그래프 (시간당 10, 30, 50 °C씩 감온 제어)

그림 4-12는 시간당 10, 30, 50 °C씩 감온 제어시 RCS 온도를 비교해 놓은 것이다.

모든 감온 구간에서 RCS 온도가 선형적으로 제어됨을 보여준다.

## 제 4 절 증기우회 제어계통 개선 방안 비교

### 1. 장·단점 분석

#### 가. 주증기 압력신호를 이용한 자동 제어

주증기 압력을 입력변수로 사용하여 RCS를 냉각하는 방식은 기존 타노형 발전소에서 기사용하는 방식으로 기존의 제어변수를 이용하므로 설계변경이 용이하다는 장점이 있다.

하지만 그림 4-3에서 보여지듯이 주증기 압력 변화에 따른 RCS 온도 변화가 선형적이지 못하여 주증기 압력 구간별로 다른 감압률을 사용하거나 별도의 냉각률 관련 함수를 사용해야 하는 문제점이 존재한다.

#### 나. RCS 온도신호를 이용한 자동 제어

RCS 평균온도( $T_{avg}$ )를 입력변수로 사용하여 RCS를 냉각하는 방식은 제어의 선형성 측면에서 주증기 압력을 입력변수로 사용하는 방법에 비해 다소 유리하다. 하지만 기존의 제어변수를 사용하지 않고 다른 계통으로부터 입력변수를 전송받기 때문에 별도의 제어기를 신설하거나 기존 제어기의 입력변수를 다중화 하는 등의 설계 변경에 어려움이 따르고 외부 계통의 영향에도 제약을 받는다는 단점이 있다

### 2. 개선방안 비교

표 4-2 증기우회 제어계통 개선 방안 비교

입력신호 항목	주증기 압력신호	RCS 온도신호
설계변경 용이성	기존의 제어변수를 사용하므로 유리함	새로운 제어변수를 사용해야하므로 불리함
RCS 온도 제어 선형성	RCS 냉각률이 선형성을 갖지 못하므로 불리함	RCS 냉각률이 선형성을 유지하므로 유리함
계통 안전성	기존의 제어변수를 사용하므로 유리함	외부 제어변수를 전송받기 때문에 외부 영향에 취약할 수 있음

표 4-1에서 보는 바와 같이 각 개선방안은 나름대로의 장·단점을 가지고 있다.

따라서 원자력발전소에서 자동제어를 이용한 RCS 냉각운전을 수행하고자 할 경우에, 이를 잘 활용하는 게 필요하다.

예를 들면, 큰 설계변경없이 기존 설비를 이용하여 자동 제어를 추진하고자 할 경우에는 “주증기 압력신호를 이용한 자동 제어”가 적절할 것이다.

하지만 증기발생기를 이용한 RCS 냉각 전 구간에서 냉각률 선형성이 우선시 된다면 “RCS 온도신호를 이용한 자동 제어”가 더 적절할 것이다.

## 제 5 장 결 론

현재 한국표준형 원전에서 증기우회 제어계통(SBCS : Steam Bypass Control System)은 정상운전 중 2차측 터빈 정지 등의 부하감발 시에도 다른 제어계통들과 조화를 이루어 원자로 정지 없이 1차계통과 2차계통의 열평형상태를 유지하는 역할을 수행하고 있으며, 또한 원자로 정지 후 RCS 온도를 제어하는 중요한 계통이기도 하다.

하지만 이 계통은 RCS 냉각운전 시, 자동제어 기능을 제공하지 않아 운전원이 RCS 온도를 제어하는데 많은 어려움을 겪고 있다.

이를 개선하고자 이번 연구에서는 2차측 증기방출 제어의 최적 개선방안으로 다음의 2가지 방안을 제시하였다.

첫번째는 증기우회 제어계통 주제어기의 주증기 압력 설정값을 시간에 따라 자동으로 감소하도록 설정하는 방법이다.

두번째는 증기우회 제어계통 주제어기의 제어값을 RCS 평균온도( $T_{avg}$ )로 전환하고 설정값을 시간에 따라 자동으로 감소하도록 설정하는 방법이다.

이 2가지 방법 모두 원자력발전소에서 사용되는 변수값을 사용하였으며 자동 제어의 실효성을 확인하기 위해 시뮬레이터를 이용한 모의시험을 수행하였다.

그 결과 이 2가지 방법 모두 제어의 선형성이 우수하여 RCS 과냉각에 의한 가압 열충격(PTS) 방지 및 환경으로의 부적절한 증기방출 문제를 해결할 수 있음을 확인하였다.

또한 증기방출 제어밸브 자동 제어시 RCS 체적 및 압력, 증기발생기 수위 등 발전소 주요 변수도 해당 제어계통에 의해 적절하게 제어됨을 확인할 수 있었다.

이에 이번 연구가 설비 신뢰성 및 운전 여유도 확보를 통한 발전소 안정운영에도 크게 기여할 수 있을 것이라 확신한다.



## 참 고 문 헌

- 1) 중수로 운전제어(I) 한국수력원자력 월성 교육훈련센터, 1996
- 2) 원자로 제어 한국수력원자력 인재개발원, 1995
- 3) “계통-3521, 증기우회 제어계통”, 한빛원자력 3발전소 운영절차서
- 4) 한빛5,6호기 운영기술지침서
- 5) 한빛5,6호기 운영기술지침서 기술배경서
- 6) CE NPSD-210 : Pressurized Thermal Shock, Operator Training Material
- 7) USNRC, Fracture Toughness Requirement, 10 CFR 50 App. G, 1995
- 8) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, 부록 G
- 9) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, 부록 E
- 10) ASTM E 185-82 July 1982
- 11) Atomic Power Review “Cold Shutdown” controversy at Fukushima Daiichi, 2011
- 12) DOE Fundamentals Handbook “Thermodynamics, Heat Transfer, and Fluid Flow”, 1992