



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](#)

2021년 2월  
석사학위논문

저출력 상태에서 급수 변화에 따른  
증기발생기 수위분석(WH)

조선대학교 대학원

원자력공학과

주 병 국

# 저출력 상태에서 급수 변화에 따른 증기발생기 수위분석(WH)

Steam Generator Level Analysis with Variation of Water Supply in  
Low Power State

2021년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

주 병 국

저출력 상태에서 급수 변화에 따른  
증기발생기 수위분석(WH)

지도교수 이 경 진

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2020년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

주 병 국

## 주병국의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 송종순 (인)

위 원 조선대학교 교수 김종현 (인)

위 원 조선대학교 교수 이경진 (인)

2020년 11월

조선대학교 대학원

# 목 차

표 목차 .....	iii
그림 목차 .....	iv
약어 설명 .....	v
ABSTRACT .....	vi
제 1 장 서 론 .....	1
1.1 배경 .....	1
1.2 수행내용 .....	1
제 2 장 원자력 발전소 2차계통 개요 .....	3
2.1 2차계통 개략 설명 .....	3
2.2 증기발생기 수위의 수축과 팽창 .....	4
제 3 장 WH 증기발생기 특성 .....	5
3.1 WH 증기 발생기 개요 .....	5
3.2 WH 증기발생기 수위 측정 방식 .....	5
3.3 증기발생기 체적변화에 따른 수위 변화 .....	6
3.4 증기발생기 2차측 유체 총중량 .....	6
제 4 장 증기발생기 수위 분석을 위한 모델 수립 .....	7
4.1 증기발생기 외부 상수 계산 및 결정 .....	7
4.2 증기발생기 관련 내부 상수 계산 및 결정 .....	10
4.3 증기발생기 급수 추가시의 수위계산 방법 설명 .....	14
4.4 증기발생기 급수 추가시의 수위변화 계산 예 .....	16
제 5 장 급수 온도 및 질량 변화에 대한 증기발생기 수위변화 .....	19
5.1 급수 온도 변화에 따른 증기발생기 수위변화 계산 수행 .....	19
5.2 급수량 변화에 따른 증기발생기 수위변화 계산 수행 .....	20

5.3 급수 변화에 따른 증기발생기 수위변화 그래프 표시 .....	21
제 6 장 운전경험 사례 분석 .....	26
6.1 운전경험 사례 .....	26
제 7 장 결 론 .....	31
붙임 1. WH 증기발생기 고유 항목 .....	32
붙임 2. IAPWS-IF97관련 사용프로그램 설명 .....	38
참고문헌 .....	40

## 표 목 차

표 5-1 급수온도 변화에 따른 증기발생기 수위변화 .....	19
표 5-2 급수양 변화에 따른 증기발생기 수위변화 .....	20
표 붙임 1-1 전출력 조건에서 구획별 체적 및 유체질량 .....	35
표 붙임 1-2 정상 수위 및 수위 측정탭 위치 .....	35



## 그림 목차

그림 2-1 2차계통 개략도 .....	3
그림 2-2 증기발생기 수위 수축 예 .....	4
그림 4-1 증기발생기 단순화 모델 .....	7
그림 4-2 증기발생기 내부 모델 .....	10
그림 5-1 급수온도 변화에 따른 수위 응답 및 소요시간 .....	21
그림 5-2 급수량 변화에 따른 수위 응답 및 소요시간 .....	22
그림 5-3 급수온도 및 급수질량 변화에 따른 투입직후 체적변화 .....	23
그림 5-4 급수온도 및 급수질량 변화에 따른 협역수위 변화 .....	24
그림 5-5 급수온도 및 급수질량 변화에 따른 최대수위 도달 시간 변화 .....	25
그림 6-1 운전경험 사례 .....	26
그림 6-2 분석모델 적용 가능여부 확인 .....	28
그림 붙임 1-1 WH 증기발생기 .....	32
그림 붙임 1-2 증기발생기 수위에 따른 체적 .....	33
그림 붙임 1-3 증기발생기 구획 별 볼륨 .....	34
그림 붙임 1-4 출력별 증기발생기 2차측 유체질량 .....	36
그림 붙임 1-5 순환비 .....	37
그림 붙임 2-1 Regions and equations of IAPWS-IF97 .....	39

## 약어 설명

WH	: WestingHouse
CR	: Cirulation Ratio
DC	: DownComer
IAPWS-IF97	: IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam
LPCV	: Low Power Control Valve
MFCV	: Main Feed Water Control Valve
FW	: Feed Water
SG	: Steam Generator

# ABSTRACT

## A Steam Generator Level Analysis with Variation of Water Supply in Low Power State

By Ju Byoung Kuk

Adviser : Prof. Lee, Goung Jin

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

In nuclear power plants, the water level is maintained by controlling the water supply when the steam generator's water level deviation occurs. During normal operation, the change in the water supply amount appears normally as the water level increases. However, in the start-up process where the water supply temperature is low, another phenomenon occurs. If supplying water at a low temperature, shrinkage occurs, and a S/G water level decrease occurs at the beginning of the injection. After a certain period of time, the water level of the steam generator rises only after the temperature of the supplied water has risen. There are many difficulties in controlling the level of the steam generator because it exhibits such an atypical characteristic at low power. It is particularly sensitive in nuclear power plants with small steam generator capacity. At low power, the change in the water level of the steam generator, which appears due to the change in the water supply temperature and the amount of water supply, is analyzed by performing a thermodynamic method.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 배 경

원자력 발전소에서 정상운전 중에는 저압급수 가열기 및 고압급수 가열기 운전으로 높은 온도의 급수가 공급되어 급수온도가 증기발생기 수위제어에 미치는 영향이 거의 없다. 하지만 발전소 기동 공정중 저출력인 상황에서는 가열용 증기 부족으로 일부 급수 가열기에 제한적인 증기만 공급되어 급수 온도를 상승시키기 어려운 실정이다. 따라서 저출력 기간중에는 증기발생기에 낮은 온도의 급수가 공급될 수밖에 없으며 이는 수축과 팽창현상 발생으로 증기발생기 수위제어에 어려움을 가져온다. 일반적으로 증기발생기 수위제어는 저출력 상태에서도 자동제어 상태를 유지하며 낮은 급수온도의 보상회로를 구성하여 수위를 제어한다. 하지만 갑작스러운 증기 사용량 증가 또는 취출수 유량 증가 등 외란이 발생하여 심한 수위 변화로 자동제어가 힘든 경우 종종 운전원이 개입하여 수동으로 운전하게 되는 경우가 있다. 급수 조절밸브 수동 운전시 저온의 급수가 과다 공급되면 초기에는 증기발생기 수위가 감소하는 방향으로 진행된다. 일정 시간 경과후 투입된 급수의 온도 상승으로 팽창하여 급격한 수위 증가를 가져온다. 이런 수위변화 특성을 미리 예측하지 못하고 초기에 수위감소 발생시 지속적으로 급수유량을 증가시킬 경우 결국에는 증기발생기 수위증가 한계치에 도달하여 터빈발전기 정지 및 원자로 정지를 불러올수 있다. 따라서 저출력 기간중 저온의 급수 온도 변화에 따른 증기 발생기 수위 변화 특성을 파악하는 것이 중요하다고 할수 있으며 이러한 특성을 알아 보기 위해 열역학적인 방법으로 수위 변화에 관하여 계산 해보고자 한다.

## 1.2 수행 내용

첫째로 증기발생기 수위분석 모델 수립을 위해서 계산에 필요한 수위와 관련된 WH형 증기 발생기 고유항목에 대해서 알아보고 필요시 계산을 수행하여 변수들을 결정한다. 그리고 분석을 위한 변수를 발전소 터빈 기동전 출력인 원자로 출력 16% 상태의 발전소 운전 수치에 근접한 값으로 가정 한다. 이에 대한 가정 변수는 증기발생기 압력, 급수 유량, 급수온도, 급수압력, 주증기 유량, 취출수 유량 등이 있다. 그리고 계산을 위하여

증기발생기를 세구역으로 나누어 단순화 시키고 계산을 위한 내부 상수를 가정 및 결정한다.

둘째로 선정된 증기발생기 내외부 변수를 이용하여 열역학에 기반한 계산을 위한 가정 사항을 결정한다. 그리고 분석을 위한 계산 방법을 설명 하고 수식 소개를 위해 실제 수치를 예로 들어 급수의 온도변화 및 질량 변화에 대하여 계산을 실시한다. 그리고 사용된 계산 방법에 대한 확인을 위하여 그래프를 작성하고 결과 값의 방향성에 대해 확인한다.

셋째로 실제 발전소에 있었던 운전경험에 대하여 기술하고, 본문에서 제시하는 방법에 의해 계산된 수치가 실제 운전경험상의 운전변수와 부합하는지 살펴 본다. 그리고 본 계산 방법을 실제 발전소 운전에 적용시킬수 있는 방법에 대하여 기술한다.

## 제 2 장 원자력 발전소 2차계통 개요

### 2.1. 2차계통 개략 설명

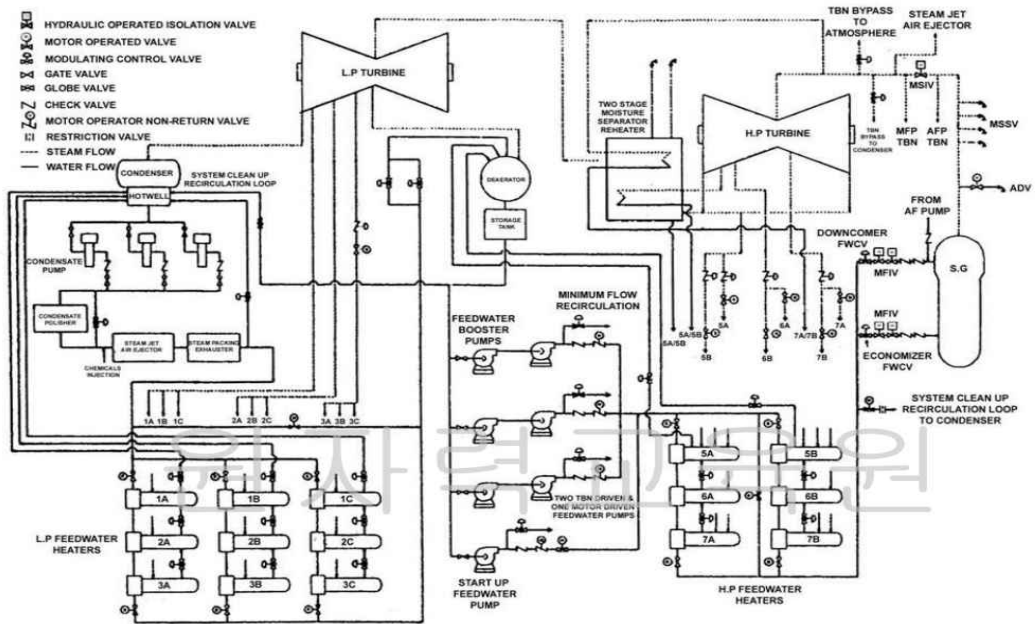


그림 2-1 2차계통 개략도 <sup>1)</sup>

2차계통은 원자로 냉각재로부터 발생된 열을 열교환을 통하여 물을 증기로 전환후 터빈으로 이동 시키고 증기의 운동에너지를 이용하여 터빈을 회전시켜 전기를 생산한다. 그리고 사용된 증기를 응축시켜 다시 물로 변화 시키는 일련의 과정으로 구성된다. 증기발생기는 원자로 냉각재로부터 열에너지를 전달받아 오는 일종의 열교환기라 할수 있다. 고리 1발전소 및 한빛 1발전소에 설치된 증기발생기는 저출력에서 수위를 제어 하기 위해 원자로 출력 20%미만에서는 주로 LPCV가 사용되며 출력 20%이상에서는 제어 용량이 큰 MFCV를 사용하여 수위를 제어 한다.

1) 출처 : [https://m.korea.kr/expertWeb/resources/files/data/document\\_file/2009/원자로계통기초2\(표준형\).pdf](https://m.korea.kr/expertWeb/resources/files/data/document_file/2009/원자로계통기초2(표준형).pdf) 15page

## 2.2 증기발생기 수위의 수축과 팽창

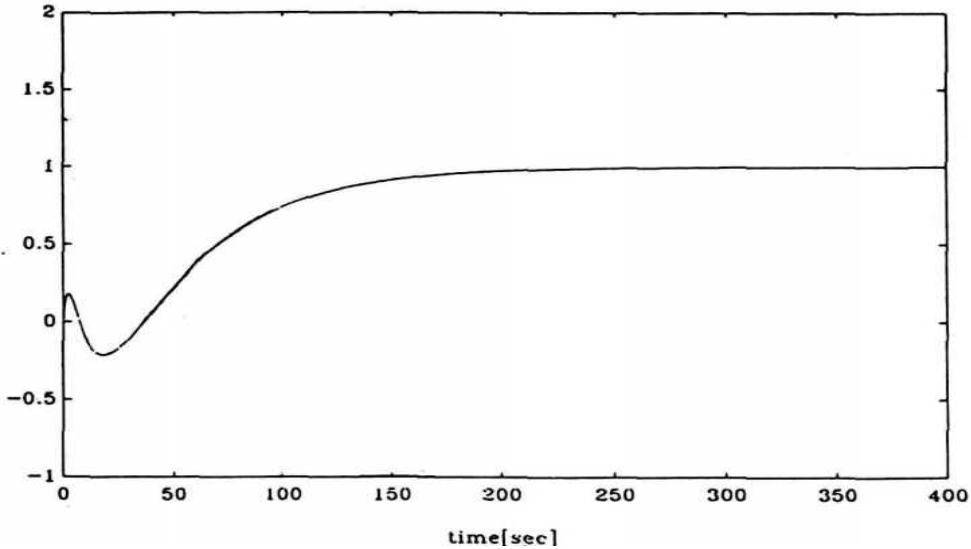


그림 2-2 저온 급수 공급에 의한 증기발생기 수위 수축 증가 예 <sup>2)</sup>

증기발생기로 공급되는 급수는 증기발생기 내부 유체보다 상대적으로 온도가 낮다. 따라서 급수 유량이 증가하면 수축 현상에 의해 오히려 일시적으로 수위가 감소하고 급수 유량이 감소하면 팽창으로 수위가 증가하는 현상을 보인다. 이러한 특성은 증기발생기와 급수간 온도차가 큰 저출력에서 현격하게 발생하며, 수축 및 팽창 및 지연시간은 급수온도 및 급수량과 상관 관계가 있다. 상기 그림은 저출력에서 급수유량을 계단 입력으로 증가시 증기발생기 수위 변화를 예시로서 나타낸 것이다.

실제 이러한 수위변화 특성을 이해하지 못하고 운전하는 경우 저온 급수 공급에 의한 수위 감소상황을 인식하지 못하고 지속적인 급수 주입으로 예상치를 상회하는 수위 증가를 가져 오게 된다. 따라서 저출력에서 급수제어 밸브 수동운전 시에는 지속적인 급수 공급 보다는 일정량의 급수를 공급하고 제어밸브를 원래 제어 위치로 복귀 시킨후 일정 시간 수위 변화를 관찰하는 방식의 운전 방법이 필요하게 된다.

2) 출처 : <https://scienceon.kisti.re.kr> 저출력 및 과도상태시 원전 증기발생기 수위제어에 관한 연구 22page

## 제 3 장 WH 증기발생기 특성

### 3.1 WH 증기 발생기 개요

증기발생기로 공급된 급수는 내부 급수링으로 공급되고 J노즐을 통하여 협역 수위 하부 탭 보다 높은 위치에서 공급되어 다운커머 지역에 유입된다. 유입된 급수는 증기발생기 외벽과 랩퍼 사이를 통과하여 튜브지역 하부로 유입되며 증기발생기 튜브사이를 통과하며 가열되어 습증기를 발생시킨다. 습증기는 증기발생기 상부 방향으로 이동하며 1차 습분분리기 및 2차 습분분리기를 통과하여 습분이 제거 된후 제어밸브를 통하여 터빈측에 공급된다. 그리고 습분 분리기에서 추출된 응축수는 다운커머 지역에 합류되어 급수를 가열하는 역할을 수행한다.

### 3.2 WH 증기발생기 수위 측정 방식

증기 발생기 하부측에는 물이, 상부측에는 증기가 존재하는데 하부측 물의 높이를 측정하여 수위로 표시한다. WH에서는 증기발생기의 수위를 두가지 방법으로 측정한다. 첫 번째는 증기발생기 하부에서부터 2차 습분분리기 하부위치까지 측정하는 광역수위 측정 방법이며, 두 번째는 급수노즐 하부위치에서 2차 습분분리기 하부까지 측정하는 협역수위 측정방법이다. 광역수위 측정의 경우 발전소 정비 기간 중 증기발생기 충수 및 배수시 사용하는 경우가 많으며 협역수위의 경우 발전소 정상운전시 제어 변수로 사용한다.

광역수위계의 측정범위는 증기발생기 하부로부터 상부 565.7inch(약 14.3m) 높이 까지 측정가능하며 협역수위계의 경우 438inch 높이에서 565.7inch 높이까지(약 3.24m 제어범위) 측정 가능하다. 그리고 정상운전 기간중에는 502inch(12.75m)의 높이에서 협역수위 50% 유지하고 있다. 따라서 협역수위 50%에서 100%까지의 높이는 1.62m의 여유를 가진다. (표 붙임1-2 참조)



### 3.3 증기발생기 체적변화에 따른 수위 변화

WH에서 제공하고 있는 문서에 따라 그림 붙임 1-2에 증기발생기 높이 변화에 따른 체적 변화를 표시하였다. 그림을 보면 협역수위는 높이 증가에 따른 체적 변화가 선형적 구간이 선정되어 있음을 알수 있다. 증기발생기 협역수위 측정구간인 438inch~565.7inch의 체적구간을 계산하면 협역 수위의 부피는  $1600\text{ft}^3(45.3\text{m}^3)$ 에 해당한다. 따라서 체적  $0.453\text{m}^3$ 의 체적 변화는 협역수위 1%의 수위변화 로 나타난다.

### 3.4 증기발생기 2차측 유체 총중량

WH에서 제공하고 있는 문서에 따라 그림 붙임 1-4에 발전소 출력변화에 따른 증기 및 액체 질량 변화에 대하여 표시하였다. 그림에 따르면 저출력에서 고출력으로 진행할수록 액체 질량은 감소하나 증기 질량은 거의 변화가 없는것을 알수 있다. 본문에서는 발전소 터빈 기동 전 출력인 원자로출력 16%에 해당하는 값을 사용한다. 그림 붙임1-4에서 확인하면 증기질량은 6000lb(2721kg)이며 액체 질량은 142000lb(64411kg)이다. 두가지를 합하여 환산한 총 유체 중량은 약 67132kg임을 알수 있다.

## 제 4 장 증기발생기 수위 분석을 위한 모델 수립

증기발생기 수위 분석을 단순화 하기 위해 다음과 같은 발전소 운전상황을 가정한다.

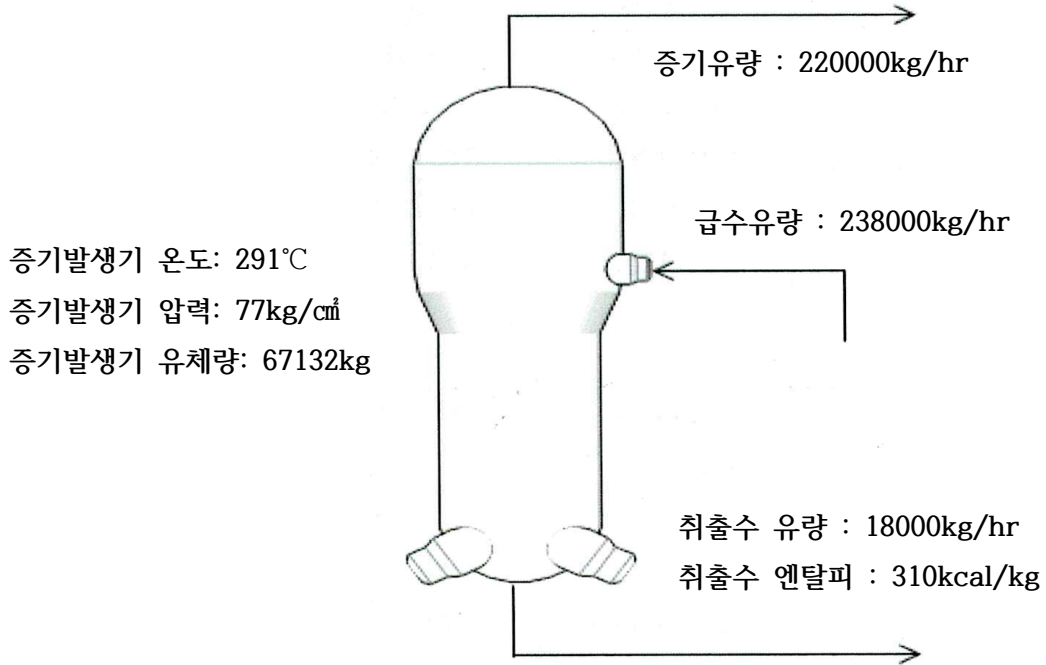


그림 4-1 증기발생기 단순화 모델 <sup>3)</sup>

### 4.1 증기발생기 외부 상수 계산 및 결정

증기발생기 외부 상수는 실제 발전소의 운전변수를 참조하여 설정하였다. 저출력 상태 해석을 위해 원자로 출력 16%에 해당 하는 운전변수들을 선정하였으며 선정 목록은 아래와 같다.

#### 가. 증기발생기 압력

터빈 운전 직전 압력인  $77\text{kg/cm}^2$ 으로 선정한다. 원자로 출력 16%에서 발생한 증기는 복수 덤프 밸브를 통하여 배출중에 있으며 압력 조절기에 의해  $77\text{kg/cm}^2$  로 설정하여 운전중 임을 가정한다.

3) 그림 참조 : 원전 2차 계통 정밀 열성능진단 (에너지지) 14page

## 나. 증기발생기 건도

증기 발생기 전체 건도는 그림 붙임 1-4를 참조하여 16% 출력에의 해당값을 구하고 증기질량을 총질량으로 나누어  $4.7138 * 10^{-3}$ 을 적용한다.

## 다. 증기발생기 온도

증기발생기 온도는 압력  $77\text{kg}/\text{cm}^2$ 에 해당하는 포화 온도인  $291^\circ\text{C}$ 를 설정한다.

## 라. 증기발생기 급수 압력

원자로 출력 16%에서 증기발생기에 공급되는 발전소 운전변수값을 참조하여 주급수 헤더 출구 압력 보다 다소 작은  $80\text{kg}/\text{cm}^2$  로 설정하였다.

## 마. 증기발생기 급수 온도

정상 출력 운전보다 낮은 상태 임을 가정 후 발전소 운전변수를 참조하여  $145^\circ\text{C}$  로 설정하였다.

## 바. 증기발생기 급수 유량

원자로 출력 16%에서 증기발생기에 공급되는 실제 발전소 운전변수값을 참조하여  $238000\text{kg}/\text{hr}$  로 설정하였다. 공급된 급수의 일부는 증기로 배출되어 복수덤프 벨브를 통하여 복수기로 회수되며 일부는 증기발생기에서 수질 정화를 위한 취출수로 배출되어 정화후 복수기로 회수된다..

## 사. 증기발생기 증기 유량

원자로 출력 16%에서 터빈 가동전을 가정하고 있으며 실제 운전변수 값을 참조하여  $220000\text{kg}/\text{h}$ 으로 설정한다.

## 아. 취출수 유량

증기발생기에 공급된 급수중 일부는 취출수 계통을 통하여 정화된후 100% 복수기로 회수 된다. 저출력 시의 운전변수 값을 참조하여  $18000\text{kg}/\text{hr}$  로 설정한다.

### 자. 취출수 엔탈피

계산 수행 없이 실제 발전소 운전변수 값을 참조하여 310kcal/kg로 설정한다.

### 차. 증기발생기 유체 중량

WH에서는 원자로 출력변화에 따른 증기 및 유체의 질량 변화를 도표로 제공하고 있다. 그림 붙임1-4를 참조하여 원자로 출력 16%에서 67132kg로 설정하였다.

### 카. 원자로 출력

원자로 출력은 발전소에서 터빈 기동 직전인 16%를 설정하였다.

### 타. 증기발생기 열 발생율

증기발생기 열 발생율은 증기발생기에서 배출되는 열량에서 들어오는 열량을 제한 값으로 정의되며 수식은 아래와 같다.

$$MW_{thermal} = Q_{sgout} * (h_{sgout} - h_{ffw}) + Q_{bf} * (h_{bf} - h_{ffw})$$

- (1)  $Q_{sgout}$  : 증기유량 kg/hr
- (2)  $h_{sgout}$  : 증기 엔탈피 kcal/kg
- (3)  $h_{ffw}$  : 급수 엔탈피 kcal/kg
- (4)  $Q_{bf}$  : 증기발생기 취출수 유량 kg/hr
- (5)  $h_{bf}$  : 취출수 엔탈피 kcal/kg

상기 공식을 적용하면 증기발생기 전체 열 발생율은

$$= 115890980 \text{ kcal/hr 이며}$$

취출수를 제외한 순수 증기유량 만의 열 발생율은

$$= 112956800 \text{ kcal/hr 이다.}$$

## 4.2 증기발생기 관련 내부 상수 계산 및 결정

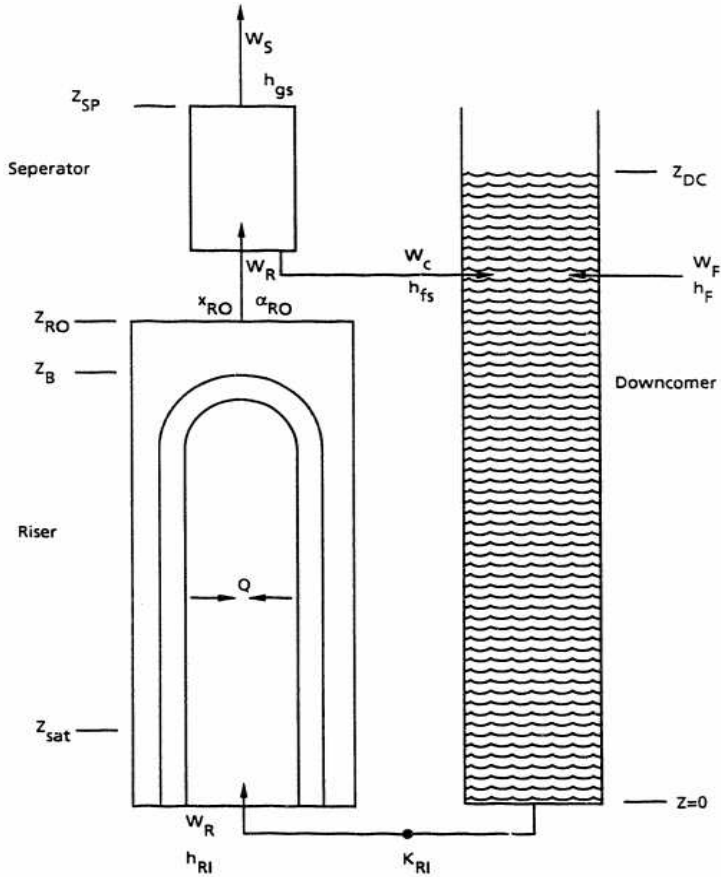


그림 4-2 증기발생기 내부 모델 <sup>4)</sup>

분석을 위하여 증기발생기 내부 모델을 RELAP5/MOD2에서 사용하는 모델을 참조하였다. 상기 모델은 증기발생기를 다운커머구역, 증기발생기 튜브 번들구역 및 습분 분리기 구역으로 나누어 단순화 하고 있다. 급수는 다운커머 지역으로 유입되어 튜브 번들 지역을 통과후 포화되어 습분 분리기에 유입되어 건조된 증기가 배출된다. 그리고 습분 분리기에서 분리된 습분은 다운커머로 유입되어 급수를 가열하는 역할을 수행한다. 그림에 표기된 세부 항목에 대한 설명은 아래와 같다.

4) 출처 : <https://www.osti.gov/servlets/purl/10168879> 77page

$W_f$	Feedwater flow rate
$W_c$	Recirculation flow rate
$W_R$	Total riser flow rate
$W_S$	Steam outlet flow rate
$h_{fs}$	Saturated liquid enthalpy
$h_{gs}$	Saturated vapour enthalpy
$h_F$	Feedwater enthalpy
$h_{RI}$	Riser inlet enthalpy
$X_{RO}$	Equilibrium quality at riser outlet
$Q$	Total primary to secondary heat transfer rate (W)
$Z_{dc}$	Elevation of water level in downcomer (m)
$Z_{sat}$	Elevation at beginning of saturated boiling

### 가. 순환비 (Circulation Ratio)

순환비는 증기발생기 외부로 유출되는 증기량과 튜브 번들지역에서 생성되는 증기의 비율이라고 할 수 있으며, 아래와 같이 정의 한다.

$$CR = \frac{\text{riser flow}}{\text{exit steam flow}} = \frac{w_R}{w_S} = 1 + \frac{w_C}{w_S}$$

WH에서는 출력별 순환비를 그림 붙임 1-5 와 같이 출력변화에 따른 순환비의 그래프로 나타내고 있다. 원자로 출력 16%의 해당 값인 18.8을 적용한다.

참고사항으로  $\frac{w_C}{w_S}$ 는 재순환비(Recirculation Ratio)로 정의된다.

### 나. 건도(위치 $Z_{RO}$ 측)

건도의 정의는 증기 질량을 총 유체의 질량을 나눈 비율이며 튜브 번들지역 출구측 건도를 정의하면 순환비의 역수로 기술 할수 있다..

$$\begin{aligned}
 x_{RO} &= \frac{1}{\text{Circulation Ratio}} \\
 &= 0.0531
 \end{aligned}$$

#### 다. Downcomer 온도

다운 커머 지역의 온도 계산식은 참고문헌 3항의 WH 제공 문서에서 참조하여 인용하였다. 아래 식은 튜브 번들과 급수 온도 차이 범위의 비열에 대한 계산은 생략하여 간략화된 식이다.

$$T_{dc} = \frac{T_{bundle} * (CR - 1) + T_{fw}}{CR}$$

- (1)  $T_{dc}$  : 다운커머 지역 온도
- (2)  $T_{bundle}$  : 튜브 번들지역 온도
- (3)  $CR$  : 순환비
- (4)  $T_{fw}$  : 급수온도

계산 결과는 아래와 같다.

$$= 283.234^{\circ}\text{C}$$

#### 라. 다운커머 지역 엔탈피

다.항에서 계산된 유체 온도를 이용하여 freesteam 함수를 사용하여 계산한 299.509 kcal/kg 값을 사용한다.

#### 마. 다운커머 지역 유체질량

WH제공 문서에서는 증기발생기 지역을 6개의 영역으로 나누고 각각의 영역에 대하여 증기 및 액체의 부피 및 질량에 대해서 수치값을 제공하고 있다. 다운커머 지역은 그림 붙임 1-3의 V1영역에 해당되며 원자로출력 16% 해당하는 다운커머 유체 질량은 표 붙임 1-1과 그림 붙임 1-4을 사용하여 비율로 계산 하면 35470.7kg으로 계산된다.

#### 바. 증기발생기 튜브 번들 지역 유체질량

증기 발생기 튜브 번들지역은 WH제공 문서의 V2영역에 해당되며, 본 해석 모델에서는 V3영역까지 포함하여 유체질량을 계산한다. 표 붙임 1-1과 그림 붙임 1-4를 사용하여 비율로 계산시 액체질량은 26988kg이다. 동일한 방법으로 증기 질량을 계산시 1368kg이며, 액체와 증기를 합한 총 유체 질량은 28356kg이다.

### 사. 증기발생기 튜브 번들 지역 건도

건도는 증기 질량과 총 유체질량의 비율로 나타낼수 있으며 식은 아래와 같다.

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{liq} + m_{vapor}}$$

(1)  $x$  : 건도

(2)  $m_{vapor}$  : 증기 질량

(3)  $m_{liq}$  : 액체 질량

해당 식에 상기항에서 구한 각 유체 질량을 대입하면 결과 값은 다음과 같다.

$$= 0.04824$$

### 아. 증기발생기 튜브 번들 지역 엔탈피

튜브 번들지역 온도는 증기 발생기 온도인 291℃와 같다고 가정하며 해당 온도의 포화 액체 엔탈피 및 포화 증기 엔탈피를 적용한다.

$$h = h_f + x(h_g - h_f)$$

(1)  $h_f$  : TUBE BUNDLE 지역 포화수 엔탈피

(2)  $h_g$  : TUBE BUNDLE 지역 포화증기 엔탈피

(3)  $x$  : TUBE BUNDLE 지역 건도

상기식을 적용하여 값을 계산하면 아래와 같다.

$$= 326.2969\text{kcal/kg}$$

### 자. 증기발생기 튜브 번들 지역 비체적 및 체적 계산

$$v = v_f + x(v_g - v_f)$$

(1)  $v_f$  : TUBE BUNDLE 지역 포화수 비체적

(2)  $v_g$  : TUBE BUNDLE 지역 포화증기 비체적

(3)  $x$  : TUBE BUNDLE 지역 건도

상기 공식을 적용하면 비체적은

$$= 0.002516 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{체적} = \text{비체적} * \text{TUBE BUNDLE 지역 유체질량}$$

$$= 71.3596 \text{ m}^3$$



### 4.3 증기발생기 급수 추가시의 수위 계산 방법 설명

급수 공급후 증기 발생기 수위 변화에 대한 계산 수행시의 몇가지 가정사항 그리고 진행 순서에 대하여 아래와 같이 기술한다. 그리고 값을 증기표 상에서 확인하기 어려운 경우 붙임 2를 참조하여 freesteam 함수를 사용하여 직접 계산하였다.

#### 가. 추가할 급수의 온도 및 양을 결정

본 분석모델에서는 추가된 급수의 온도와 질량을 이용하여 증기발생기에 순간적으로 주입되고 균일하게 섞이는 상황을 가정하여 계산을 진행한다. 증기표의 포화곡선을 이용한 분석을 수행하므로 과도한 급수 질량 선정시 계산 결과가 증기표의 포화 영역을 벗어날수 있다.

#### 나. 급수 추가 주입 후 다운커머측 내부에너지(u)를 계산한다.

다운 커머측 내부 에너지는 기존에 있던 유체의 총 내부 에너지에 추가 주입된 급수의 에너지의 더한 값을 총 질량으로 나눈 값으로 구할수 있다. 변화된 다운 커머측 속성 값을 freesteam 함수를 사용하여 계산하기 위한 값으로 사용 한다.

#### 다. 급수 추가 주입된 후 다운커머측 엔탈피를 계산

나.항에서 계산된 내부에너지(u)를 이용하여 freesteam 프로그램상의 압력과 내부 에너지에 대한 속성값 취득 함수를 사용하여 새로운 다운커머측 엔탈피를 계산한다.

#### 라. 다운커머 지역 엔탈피 감소량 계산

증기발생기 내부 상수인 다운 커머 지역 엔탈피와 다.항의 결과값의 차이를 계산

#### 마. TUBE BUNDLE 지역 엔탈피 변화량 적용

본 분석모델 에서는 협역 수위 최대 감소분을 계산 목표로 하므로 다운커머 지역 엔탈피 감소가 TUBE BUNDLE 지역으로 전부 반영되는 것으로 가정한다.

#### 바. TUBE BUNDLE 지역 새로운 건도 계산

마.항에서 계산한 엔탈피 값을 이용하여 열역학 공식을 사용하여 새로운 건도를 계산한다.

#### 사. TUBE BUNDLE 지역 새로운 비체적 및 체적계산

바.항에서 계산된 건도 값을 이용하여 열역학 공식을 적용 비체적 및 체적을 계산한다.

#### 아. 체적변화에 따른 협역수위 변화 계산

증기발생기 내부 변수인 TUBE BUNDLE 지역 체적에서 사.항에서 계산된 값을 감산하여 체적 변화를 계산한다. 그리고 부피변화에 따른 협역 수위변화를 계산한다.

#### 자. 증기발생기 유체온도 회복에 필요 열량 계산

TUBE BUNDLE 지역 엔탈피와 급수의 엔탈피 차를 질량과 곱하여 열량을 계산한다.

#### 차. 추가된 급수에 의해 최고 수위 도달까지 최소 소요시간 계산

자.항에서 계산된 결과값을 증기발생기 외부변수인 열발생율로 나누어 소요시간을 계산한다. 본 모델에서는 증기발생기 발생열이 모두 추가된 급수에 전달되는 것을 가정한다.

#### 카. TUBE BUNDLE 체적 및 수위 변화 계산

사.항에서 계산된 TUBE BUNDLE 비체적과 총 유체 증량을 사용하여 유체 부피 변화를 계산한다. 여기서 계산된 값은 추가 급수가 가열이 완료되어 유체(증기+액체) 부피가 TUBE BUNDLE 지역에 존재하는 것을 가정한다. 이렇게 계산된 값은 증기 발생기 최대 수위 증가값으로 나타낸다.

#### 타. 증기발생기 최종 유체 체적 및 수위변화 계산

시간이 경과하여 증기발생기에 공급된 급수가 분산되어 증기발생기 전체에 분포하는 것을 가정하여 계산한다. 원래 증기발생기 유체량과 급수량을 합한후 증기발생기 최초 비체적을 곱하여 계산한다. 계산 결과를 최초 증기발생기 유체 체적과 비교하여 체적 변화량 및 수위변화를 계산한다.

#### 4.4 증기발생기 급수 추가시의 수위 변화 계산 예

실제 급수 공급 관련된 값을 가정하고 4.3항에서 기술하였던 순서대로 수식과 함께 표기 후 계산을 수행한 결과는 아래와 같다.

##### 가. 급수 추가 변수

- (1) 급수온도 : 75℃
- (2) 급수 압력 : 80kg/cm<sup>2</sup>
- (3) 급수 질량 : 300kg

##### 나. 급수 추가 주입시 다운커머 측 내부에너지 계산

$$u = \frac{m_1 * u_1 + m_2 * h_2}{m_1 + m_2}$$

- (1)  $m_1$  : DownComer 유체 질량
- (2)  $u_1$  : DownComer 유체 내부에너지
- (3)  $m_2$  : 추가 급수 질량
- (4)  $h_2$  : 추가 급수 엔탈피

상기 공식을 적용하면 변화된 DownComer 측 내부에너지는  
 = 295.2401 kcal/kg

##### 다. 새로운 DownComer 측 엔탈피를 계산 (freesteam 프로그램이용)

= 297.6508 kcal/kg

##### 라. DownComer 측 엔탈피 변화량

= 1.8581 kcal/kg 감소됨

##### 마. 변화된 DownComer 온도에 의해 TUBE BUNDLE 지역 엔탈피도 동일하게 감소할 것을 가정

= 326.2969 - 1.8581 = 324.4388 kcal/kg

바. TUBE BUNDLE 지역 새로운 건도 계산

$$x = \frac{h - h_f}{h_g - h_f}$$

- (1)  $h_f$  : TUBE BUNDLE 지역 포화수 엔탈피
- (2)  $h_g$  : TUBE BUNDLE 지역 증기 엔탈피
- (3)  $h$  : TUBE BUNDLE 새로운 엔탈피

상기 공식을 적용하면 변화된 건도는  
 = 0.00429

사. TUBE BUNDLE 지역 급수 추가후 비체적 및 체적 계산

$$v = v_f + x(v_g - v_f)$$

- (1)  $v_f$  : TUBE BUNDLE 지역 포화수 비체적
- (2)  $v_g$  : TUBE BUNDLE 지역 포화증기 비체적
- (3)  $x$  : TUBE BUNDLE 지역 급수 추가후 건도

상기 공식을 적용하면 비체적은  
 = 0.002390 m<sup>3</sup>/kg

$$\begin{aligned}
 \text{체적} &= \text{급수 투입후 비체적} * \text{TUBE BUNDLE 지역 유체질량} \\
 &= 67.7926 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

아. 변화된 체적에 의한 협역 수위 변화

$$\begin{aligned}
 \text{협역 수위변화} &= \text{TUBE BUNDLE 지역체적변화} * 1\%/0.453\text{m}^3 \\
 &= 3.566\% \text{ 감소}
 \end{aligned}$$

자. 증기발생기측 유체 온도 회복을 위한 필요 열량 계산

$$\begin{aligned}
 \text{필요열량} &= (\text{TUBE BUNDLE 지역 엔탈피} - \text{추가 급수 엔탈피}) * \text{추가 급수량} \\
 &= 74942 \text{ kcal}
 \end{aligned}$$

차. 추가된 급수에 의한 최고 수위 도달까지 최소 소요시간 계산

$$\begin{aligned}
 \text{소요시간} &= \text{필요열량} / \text{증기발생기 열출력} \\
 &= 2.388 \text{ sec}
 \end{aligned}$$

카. TUBE BUNDLE 체적 및 수위 변화 계산

$$\begin{aligned}
 \text{TUBE BUNDEL 체적} &= \text{TUBE BUNDLE 비체적} * \\
 &\quad (\text{TUBE BUNDLE 지역 유체질량} + \text{추가급수량})
 \end{aligned}$$

$$= 72.114\text{m}^3$$

$$\text{체적 변화} = \text{TUBE BUNDEL 최종 체적} - \text{TUBE BUNDEL 최초체적}$$

$$= 0.7549\text{m}^3$$

$$\text{최대 협역수위 변화} = \text{TUBE BUNDLE 지역체적변화} * 1\%/0.453\text{m}^3$$

$$= 1.666\% \text{ 증가}$$

타. 증기발생기 최종 체적 및 수위변화

$$\text{증기발생기 최종체적} = \text{증기발생기 비체적} * (\text{증기발생기 유체질량} + \text{추가급수량})$$

$$= 99.9361\text{m}^3$$

$$\text{증기발생기 체적 변화} = \text{증기발생기 최종 체적} - \text{증기발생기 최초 체적}$$

$$= 0.4446\text{m}^3$$

$$\text{최종 협역수위 변화} = \text{증기발생기 체적 변화} * 1\%/0.453\text{m}^3$$

$$= 0.9814\%$$

## 제 5 장 급수 온도 및 질량 변화에 대한 증기발생기 수위변화

### 5.1 급수 온도 변화에 따른 증기발생기 수위변화 계산 수행

급수 온도 변화에 대해 4장의 계산 방법을 적용하여 300kg 급수 추가 투입 조건에서 급수온도를 20℃~200℃ 까지 5℃간격 으로 수위변화를 계산한 결과는 아래와 같다.

추가급수 양(kg)	급수온 도(℃)	Tube bundel 새 체적	투입직후 체적변화(m <sup>3</sup> )	투입직후 수위변화(%)	수위도달 소요시간(sec)	최대 수위변화(%)	최종수위변화 (%)
300	20	66.907	-4.452	-9.829	2.911	1.666	0.981
300	25	66.987	-4.372	-9.651	2.864	1.666	0.981
300	30	67.067	-4.291	-9.473	2.816	1.666	0.981
300	35	67.148	-4.211	-9.296	2.769	1.666	0.981
300	40	67.228	-4.130	-9.118	2.721	1.666	0.981
300	45	67.309	-4.050	-8.941	2.674	1.666	0.981
300	50	67.389	-3.969	-8.763	2.626	1.666	0.981
300	55	67.470	-3.889	-8.585	2.579	1.666	0.981
300	60	67.550	-3.808	-8.407	2.531	1.666	0.981
300	65	67.631	-3.728	-8.230	2.483	1.666	0.981
300	70	67.712	-3.647	-8.052	2.436	1.666	0.981
300	75	67.792	-3.566	-7.873	2.388	1.666	0.981
300	80	67.873	-3.486	-7.695	2.340	1.666	0.981
300	85	67.954	-3.405	-7.517	2.292	1.666	0.981
300	90	68.035	-3.324	-7.338	2.245	1.666	0.981
300	95	68.116	-3.243	-7.159	2.197	1.666	0.981
300	100	68.197	-3.162	-6.980	2.149	1.666	0.981
300	105	68.278	-3.080	-6.801	2.101	1.666	0.981
300	110	68.360	-2.999	-6.621	2.053	1.666	0.981
300	115	68.441	-2.917	-6.441	2.004	1.666	0.981
300	120	68.523	-2.836	-6.261	1.956	1.666	0.981
300	125	68.605	-2.754	-6.080	1.908	1.666	0.981
300	130	68.687	-2.672	-5.899	1.859	1.666	0.981
300	135	68.769	-2.590	-5.718	1.811	1.666	0.981
300	140	68.851	-2.507	-5.536	1.762	1.666	0.981
300	145	68.934	-2.425	-5.354	1.713	1.666	0.981
300	150	69.017	-2.342	-5.171	1.664	1.666	0.981
300	155	69.100	-2.259	-4.988	1.615	1.666	0.981
300	160	69.183	-2.176	-4.804	1.566	1.666	0.981
300	165	69.266	-2.092	-4.619	1.517	1.666	0.981
300	170	69.350	-2.008	-4.434	1.467	1.666	0.981
300	175	69.434	-1.924	-4.248	1.418	1.666	0.981
300	180	69.519	-1.840	-4.062	1.368	1.666	0.981
300	185	69.604	-1.755	-3.875	1.317	1.666	0.981
300	190	69.689	-1.670	-3.687	1.267	1.666	0.981
300	195	69.774	-1.584	-3.498	1.217	1.666	0.981
300	200	69.860	-1.498	-3.308	1.166	1.666	0.981

표 5-1 급수온도 변화에 따른 증기발생기 수위변화

## 5.2 급수량 변화에 따른 증기발생기 수위변화 계산 수행

급수 질량 변화에 대해 4장의 계산 방법을 적용하여 75℃ 온도 조건에서 50kg~1850kg까지 50kg 간격으로 추가 투입되는 급수에 대한 수위변화를 계산한 결과는 아래와 같다.

추가급수량(kg)	급수온도(℃)	Tube bundle 새 체적	투입직후 체적변화(m <sup>3</sup> )	투입직후 수위변화(%)	최종수위 소요시간(sec)	최대 수위변화(%)	최종수위변화(%)
50	75	70.762	-0.596	-1.317	0.398	0.277	0.163
100	75	70.165	-1.194	-2.636	0.796	0.555	0.327
150	75	69.569	-1.789	-3.951	1.194	0.833	0.490
200	75	68.975	-2.383	-5.262	1.592	1.111	0.654
250	75	68.383	-2.976	-6.570	1.990	1.388	0.817
300	75	67.792	-3.566	-7.873	2.388	1.666	0.981
350	75	67.203	-4.155	-9.174	2.786	1.944	1.145
400	75	66.616	-4.743	-10.470	3.184	2.222	1.308
450	75	66.030	-5.329	-11.763	3.582	2.499	1.472
500	75	65.446	-5.913	-13.053	3.980	2.777	1.635
550	75	64.863	-6.495	-14.339	4.378	3.055	1.799
600	75	64.283	-7.076	-15.621	4.776	3.333	1.962
650	75	63.703	-7.655	-16.900	5.174	3.610	2.126
700	75	63.126	-8.233	-18.175	5.573	3.888	2.290
750	75	62.550	-8.809	-19.446	5.971	4.166	2.453
800	75	61.975	-9.383	-20.714	6.369	4.444	2.617
850	75	61.402	-9.956	-21.979	6.767	4.722	2.780
900	75	60.831	-10.527	-23.240	7.165	4.999	2.944
950	75	60.262	-11.097	-24.498	7.563	5.277	3.108
1000	75	59.693	-11.665	-25.752	7.961	5.555	3.271
1050	75	59.127	-12.232	-27.002	8.359	5.833	3.435
1100	75	58.562	-12.797	-28.250	8.757	6.110	3.598
1150	75	57.998	-13.360	-29.493	9.155	6.388	3.762
1200	75	57.436	-13.922	-30.734	9.553	6.666	3.925
1250	75	56.876	-14.482	-31.971	9.951	6.944	4.089
1300	75	56.317	-15.041	-33.204	10.349	7.221	4.253
1350	75	55.760	-15.599	-34.435	10.748	7.499	4.416
1400	75	55.204	-16.154	-35.662	11.146	7.777	4.580
1450	75	54.650	-16.709	-36.885	11.544	8.055	4.743
1500	75	54.097	-17.262	-38.106	11.942	8.332	4.907
1550	75	53.546	-17.813	-39.322	12.340	8.610	5.070
1600	75	52.996	-18.363	-40.536	12.738	8.888	5.234
1650	75	52.448	-18.911	-41.747	13.136	9.166	5.398
1700	75	51.901	-19.458	-42.954	13.534	9.444	5.561
1750	75	51.356	-20.003	-44.157	13.932	9.721	5.725
1800	75	50.812	-20.547	-45.358	14.330	9.999	5.888
1850	75	50.269	-21.089	-46.555	14.728	10.27	6.052

표 5-2 급수량 변화에 따른 증기발생기 수위변화

## 5.3 급수 변화에 따른 증기발생기 수위변화 그래프 표시

### 5.3.1 급수 온도 변화에 따른 수위 응답 및 소요 시간

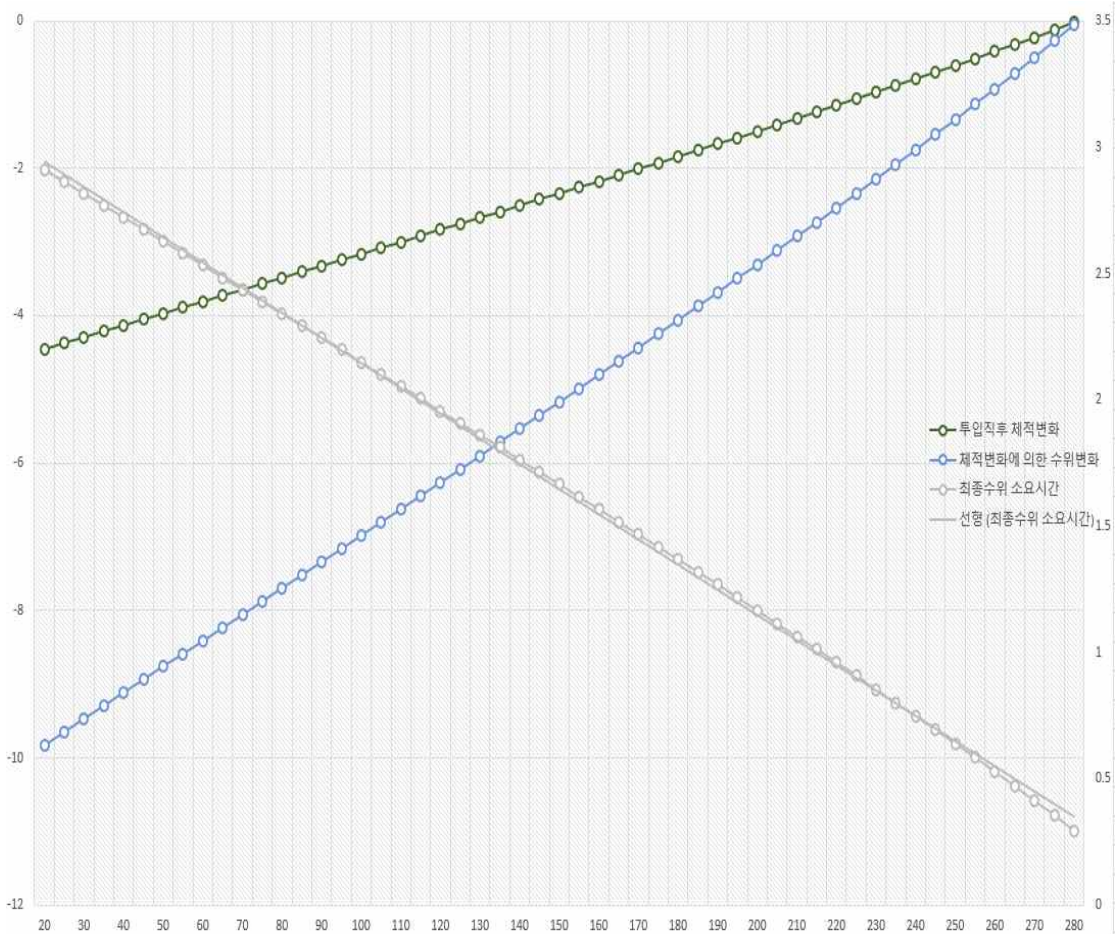


그림 5-1 급수온도 변화에 따른 수위 응답 및 소요시간

투입되는 급수온도 20°C~280°C까지의 범위에 대해 5.1항에서 수행한 계산결과를 그래프로 표시하였다. x축은 급수온도의 변화를 나타내며, 좌측 y축은 수축에 의한 수위변화를 나타낸다. 그리고 우측 y축은 최대수위 도달까지의 최소 소요시간을 나타낸다. 급수 온도가 증가 함에 따라 수위 감소 폭은 줄어들고 소요시간은 감소함을 알 수 있다.



### 5.3.2 급수량 변화에 따른 수위 응답 및 소요 시간

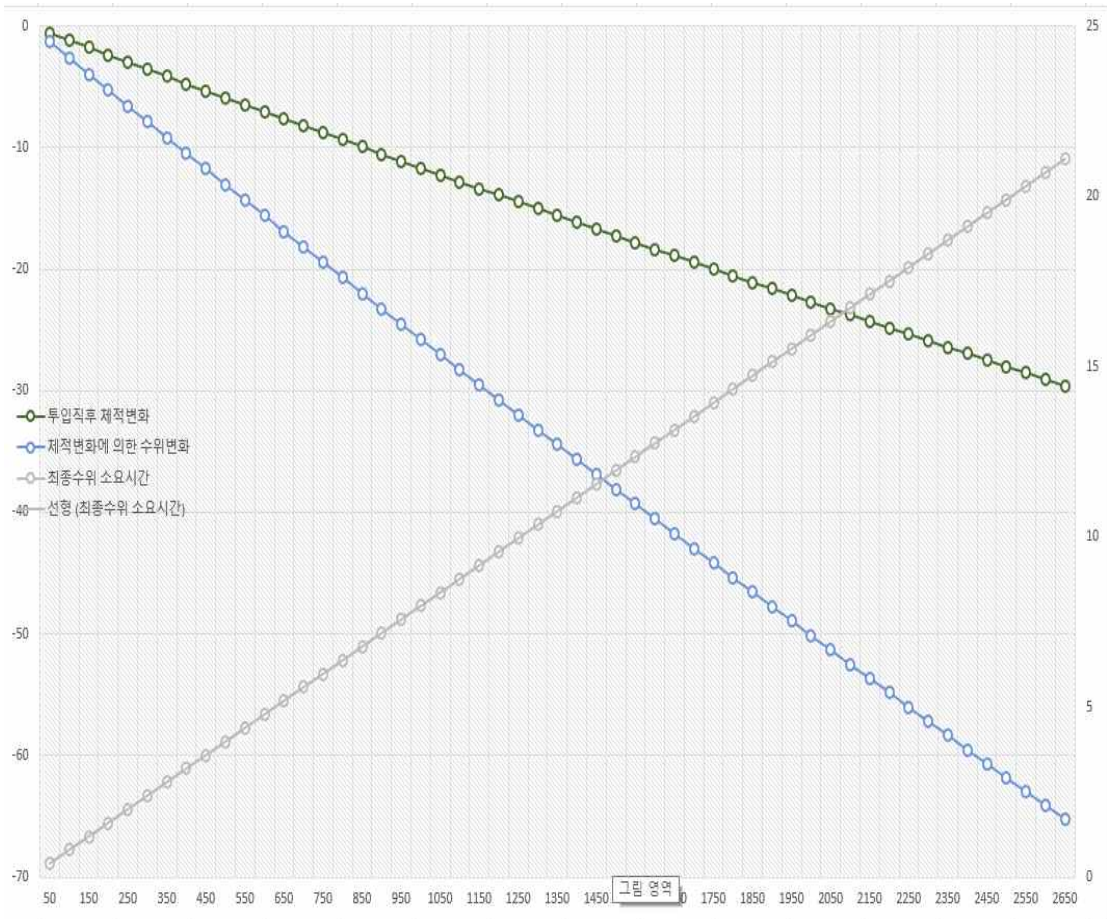


그림 5-2 급수량 변화에 따른 수위 응답 및 소요시간

투입되는 급수량을 50kg~2650kg까지의 변화시킨 5.2항에서 수행한 계산결과를 그래프로 표시하였다. x축은 급수량의 변화를 나타내며, 좌측 y축은 수축에 의한 수위 변화를 나타낸다. 그리고 우측 y축은 최대수위 도달까지의 최소 소요시간을 나타낸다. 급수량이 증가 함에 따라 수위 감소 폭은 확대되며 소요시간은 점점 증가함을 알 수 있다.

### 5.3.3 급수온도 및 급수 질량 동시 변화에 따른 증기발생기 유체 상태변화

급수온도 20℃~280℃ 에 대하여 5℃ 간격으로 53건, 그리고 급수 질량 50kg~2650kg 에 대하여 50kg간격으로 53건으로 구분하고 각각 변수를 변화시켜 총 2809건에 대하여 계산을 실시하였다. 계산은 엑셀 프로그램 및 freesteam 함수를 사용하여 수행하였으며, 수행결과는 3차원 그래프 작성을 위하여 투입 직후 체적 변화 및 협역수위 변화 그리고 수위응답시간에 대하여 각각 피벗 테이블을 작성하였다.

#### 가. 급수온도 및 급수 질량 변화에 따른 투입직후 체적변화

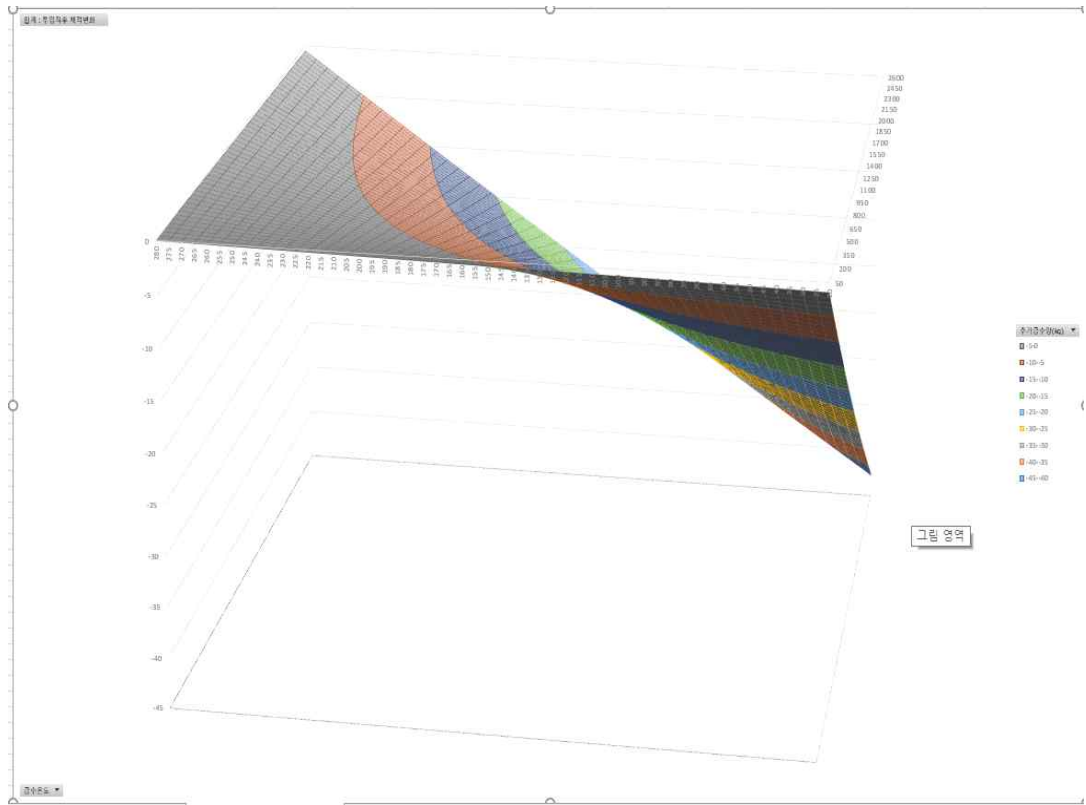


그림 5-3 급수온도 및 급수질량 변화에 따른 투입직후 체적변화

급수온도 및 급수 질량을 동시 변화 시켜 투입 직후 수축에 의한 유체 체적 감소에 대하여 3차원 그래프로 표시하였다. x축은 급수온도의 변화이며, y축은 급수 질량의 변화를 나타낸다. 그리고 z축은 증기발생기 투입 직후의 체적 감소량을 나타낸다. 위 그래프를 확인하면 투입 질량 증가 및 투입 온도 감소에 대하여 체적 감소량이 증가함을 알수 있다.

### 나. 급수온도 및 급수 질량 변화에 따른 협역 수위 변화

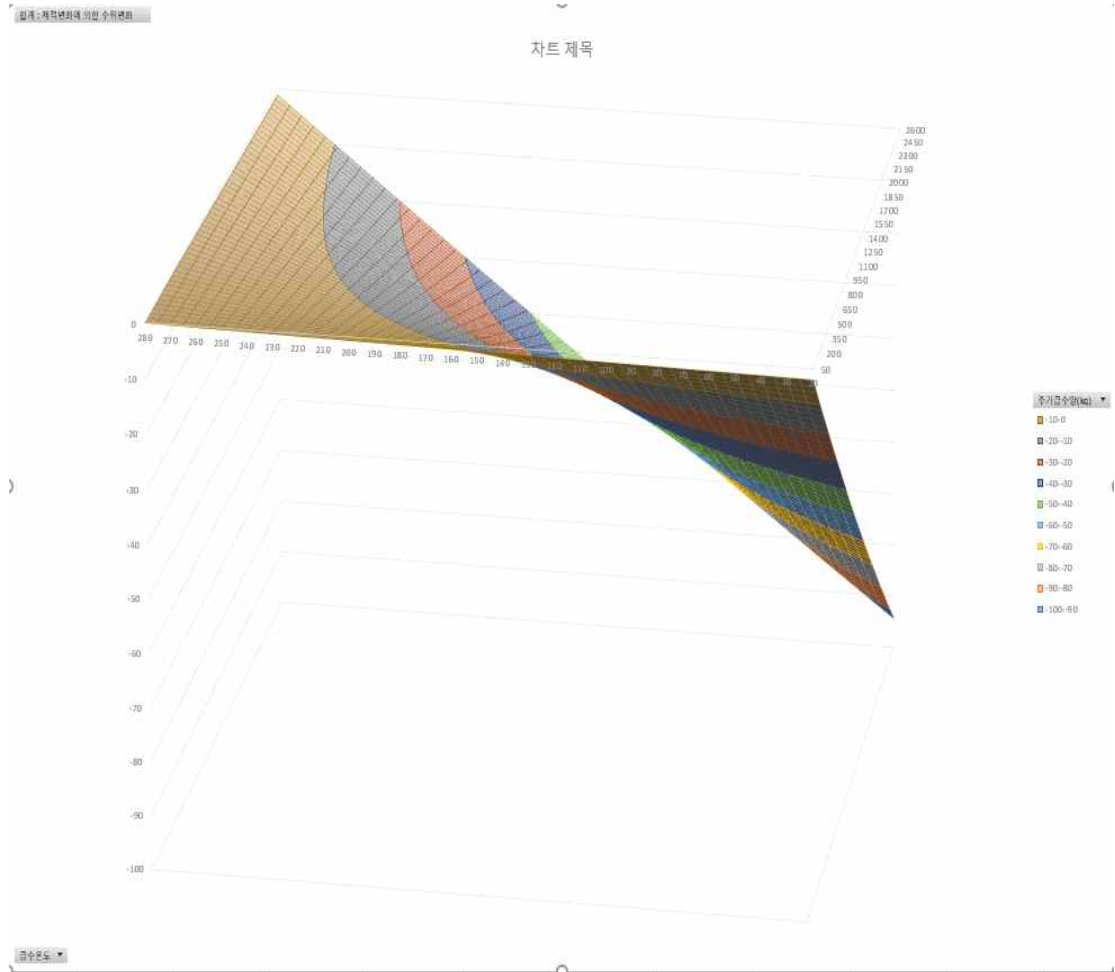


그림 5-4 급수온도 및 급수질량 변화에 따른 협역수위 변화

급수온도 및 급수 질량을 동시 변화 시켜 투입 직후 수축에 의한 협역 수위 감소에 대하여 3차원 그래프로 표시하였다. x축은 급수온도의 변화이며, y축은 급수 질량의 변화를 나타낸다. 그리고 z축은 증기발생기 협역수위 레벨을 나타낸다. 위 그래프를 확인하면 투입 질량 증가 및 투입 온도 감소에 대하여 협역수위 감소량이 증가함을 알 수 있다.

## 다. 급수 온도 및 급수 질량 변화에 따른 최대수위 도달시간

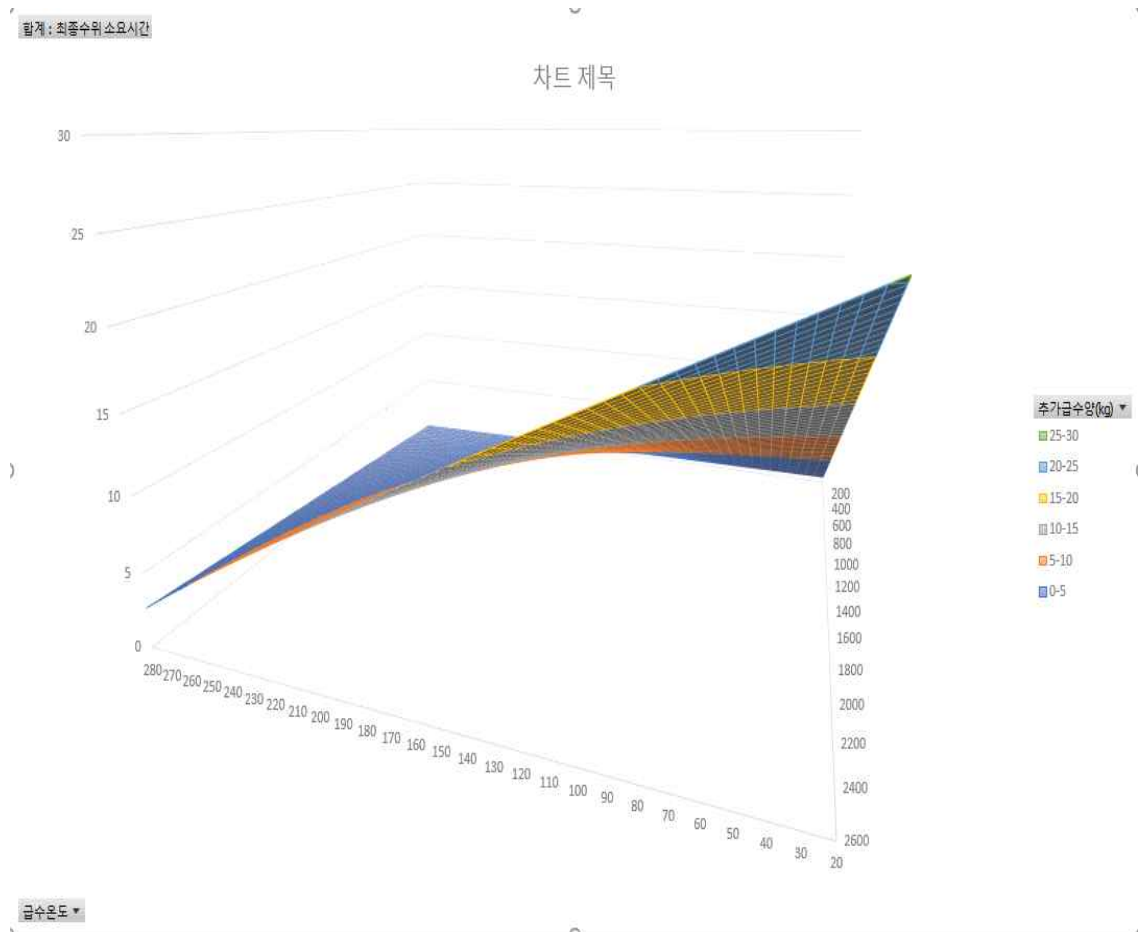


그림 5-5 급수 온도 및 급수 질량 변화에 따른 최대수위 도달 시간 변화

급수 온도 및 급수 질량을 동시 변화 시켜 투입후 증기 발생기 최대수위 도달까지의 최소 소요시간에 대하여 3차원 그래프로 표시하였다. x축은 급수 온도의 변화이며, y 축은 급수 질량의 변화를 나타낸다. 그리고 z축은 최대수위 도달시간을 나타낸다. 투입 질량 증가 및 투입 온도 감소에 대하여 수위 도달 시간이 증가함을 알수 있다.

## 제 6 장 운전경험 사례 분석

### 6.1 운전경험 사례

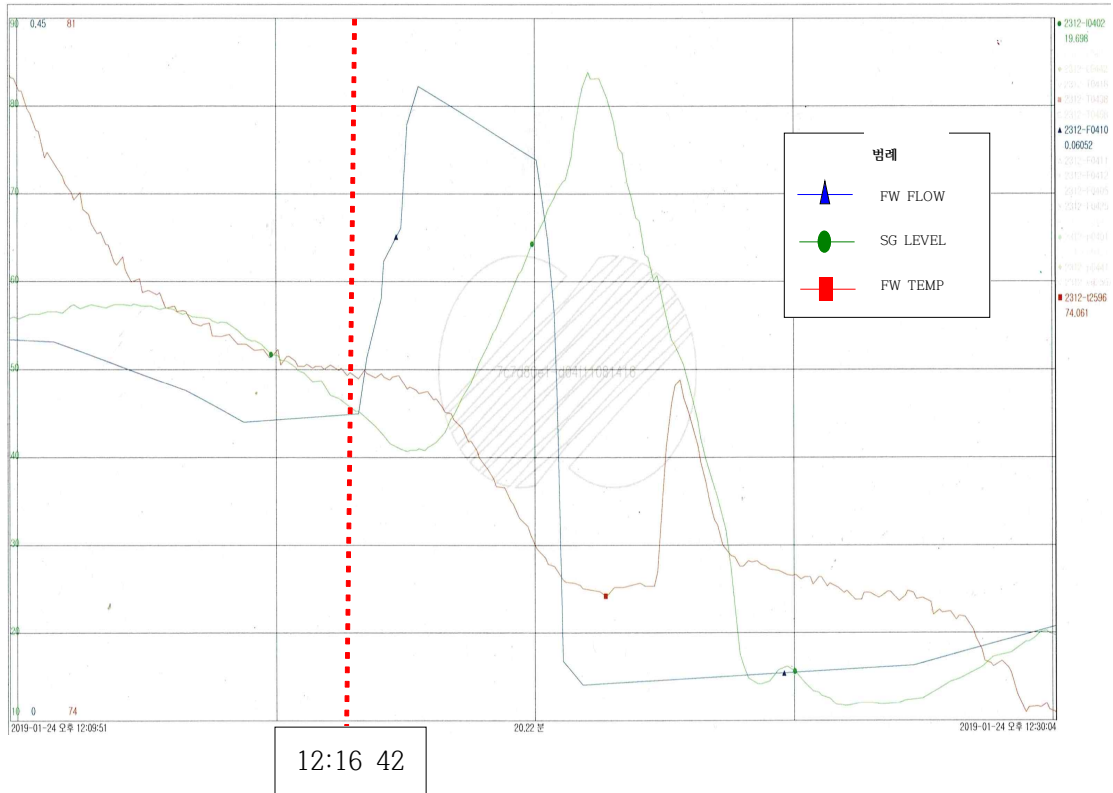


그림 6-1 운전경험 사례

#### 6.1.1 운전경험 개요

발전소 기동 운전중 원자로 출력 16%, 증기발생기 급수 공급 유량은 0.22Mkg/hr 을 유지하고 있는 상황이다. 무부하 운전을 위한 복수기 증기덤프 및 증기발생기 취출수 유량 형성으로 증기발생기 외부로 증기 및 급수가 지속적으로 유출되고 있다. 증기발생기 수위제어를 위해서 저출력 제어밸브(LPCV)는 자동 운전이다. 외란에 의한 증기발생기 수위 제어 불안정으로 수위가 45%까지 감소하여 12:16분 42초 경 운전원이 수동개입을 시작하였고 저온(80°C)의 급수 과다 공급에 의해 증기 발생기 수위가 약 83% 까지 증가한 사례이다. 상기 그래프를 살펴보면 적색은 급수온도

이며 파란색은 급수량을 나타낸다. 그리고 초록색은 증기발생기 수위를 나타낸다. 운전원이 급수조절을 수동 개입후에도 저온급수 공급으로 수축현상이 나타나고 그 후 과다공급된 급수와 팽창효과에 의해 증기발생기 수위가 급속하게 증가하는 것을 알수 있다. 위 그래프에서 정상 공급된 유량보다 추가 공급된 급수량을 계산해 보면 약 11245kg으로 확인되며 증기발생기 수위는 83%까지 증가하였고 운전원 수동 개입후 최고 수위까지 소요된 시간은 약 4분 30초이다.

### 6.1.2 운전경험에 분석모델 적용 후 비교

추가 투입된 급수량 11245kg 및 급수 온도 80℃를 반영하여 4장에서 설정한 분석모델을 적용시켜보면 결과는 다음과 같이 계산된다. 분석 모델에서는 순간적인 급수주입에 대하여 계산하나 운전경험상의 급수 주입 시간은 약 4분 정도 소요되므로 투입 직후 체적변화 및 수위변화 수치는 계산에서 제외하였다.

- 1) 최대 수위 도달 최소 소요 시간 : 87.7378 sec
- 2) 최대 수위변화 : 62.4696 %
- 3) 최종 수위변화 : 36.7889 %

상기 계산 결과에서 최대 수위 도달 까지의 최소 소요 시간인 87.7초는 운전 경험의 증기발생기 수위 최종 도달 시간인 4분 30초와 비교해 볼때 적용 가능하다. 수위 변화량의 경우 나타날 수 있는 범위가 최종 수위변화에서 최대 수위변화 사이로 예측되는데 수위 변화 모델 적용결과 36.7889% ~ 62.3469% 사이값을 가질 것으로 계산되었다. 운전 경험상 실제 수위는 45%에서 83% 까지 변화로 약 38% 증가량을 가진다. 38%수치는 해당 모델을 적용한 계산값인 최종수위변화에서 최대 수위변화 사이에 위치함을 알수 있다.

### 6.1.3 발전소 운전중 분석모델 적용 가능여부 확인

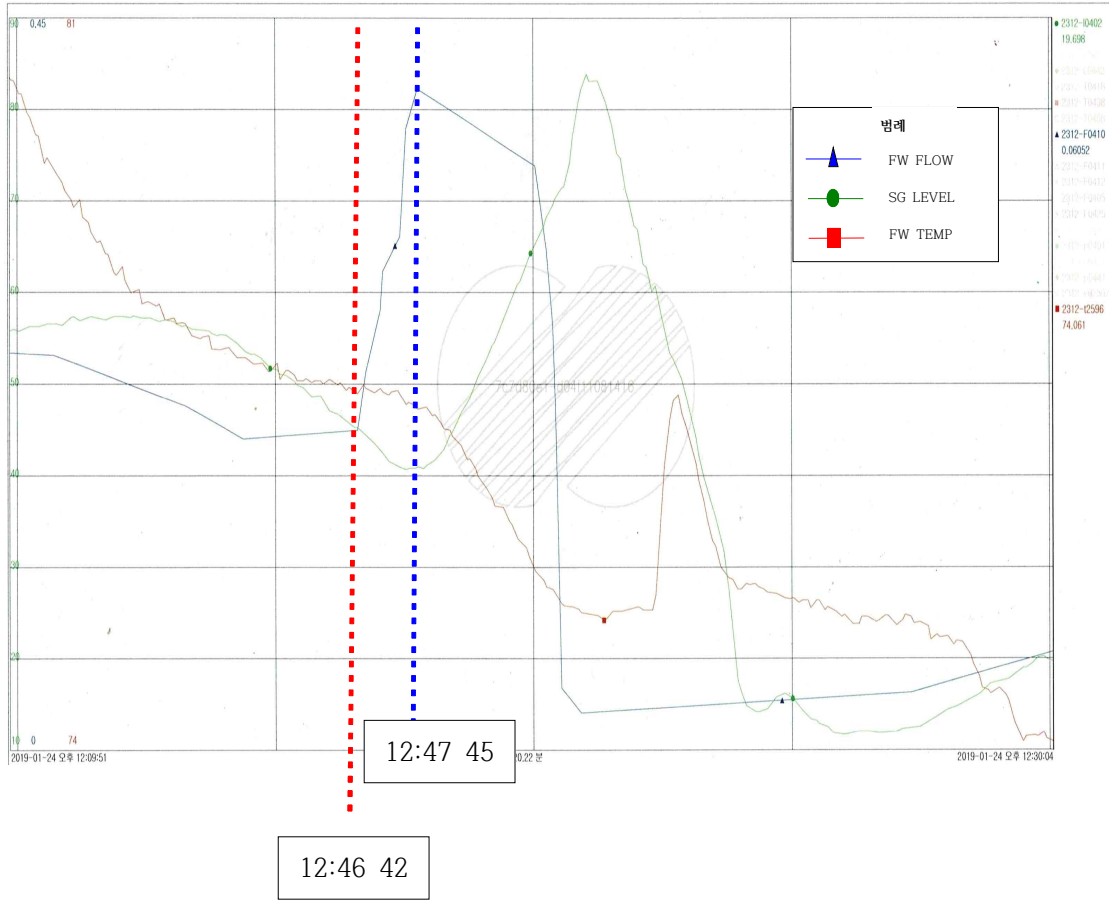


그림 6-2 분석모델 적용 가능여부 확인

분석모델 적용을 위하여 12:46분 42초에 운전원이 수동 조작을 시작하고 12:47분 45초까지 추가 주입된 급수량을 사용한다. 추가 급수량 (1617kg), 급수온도(80℃)를 사용하여 수위 분석모델을 적용 결과는 아래와 같다. 급수 주입 시간이 약 1분 정도 소요되므로 투입직후 체적변화 및 수위변화 수치는 계산에서 제외하였다.

- 1) 최대 수위 도달 최소 소요 시간 : 12.6164 sec
- 2) 최대 수위변화 : 8.9829 %
- 3) 최종 수위변화 : 5.2901 %



상기계산 결과에서 유추 가능한 결론은 최대수위 도달 최소소요 시간의 경우 가장 높은수위가 나타날 수 있는 가장 짧은 시간이 12.6초인 것을 나타낸다. 그리고 시간 경과후 도달할수 있는 수위 변화는 약 5.2901% ~ 8.9829% 사이로 계산된다. 따라서 급수유량을 급격하게 늘린 12:47분 45초 시점에 증기발생기 현재 수위는 최저 수위인 약 41%를 지시하고 있지만 사전에 수위 분석 모델을 적용하여 최대로 나타날 수 있는 수위 변화량 8.9%를 적용하여 수위 증가 여부를 미리 통보해 주었다면 상기 운전사례와 같은 증기발생기 고수위 (83%)에 의한 과도 상태 발생은 회피할 수 있었을 것으로 판단된다.

### 6.1.4 발전소에서 증기발생기 수위 분석모델 적용 방법 설명

수위 분석모델을 운전 경험에 적용결과 수축에 대한 수위 변화 수치값은 직접 적용하기 힘들나 감소에 대한 방향성은 적용할수 있다. 그리고 계산된 소요시간 및 최종 수위 변화값을 참조하여 향후 수위 변화를 사전에 예측해 볼수 있다. 실제 원자력 발전소에 적용하여 운전 참조 변수로 사용하기 위해 다음과 같은 활용 방법을 고려해 볼 수 있다.

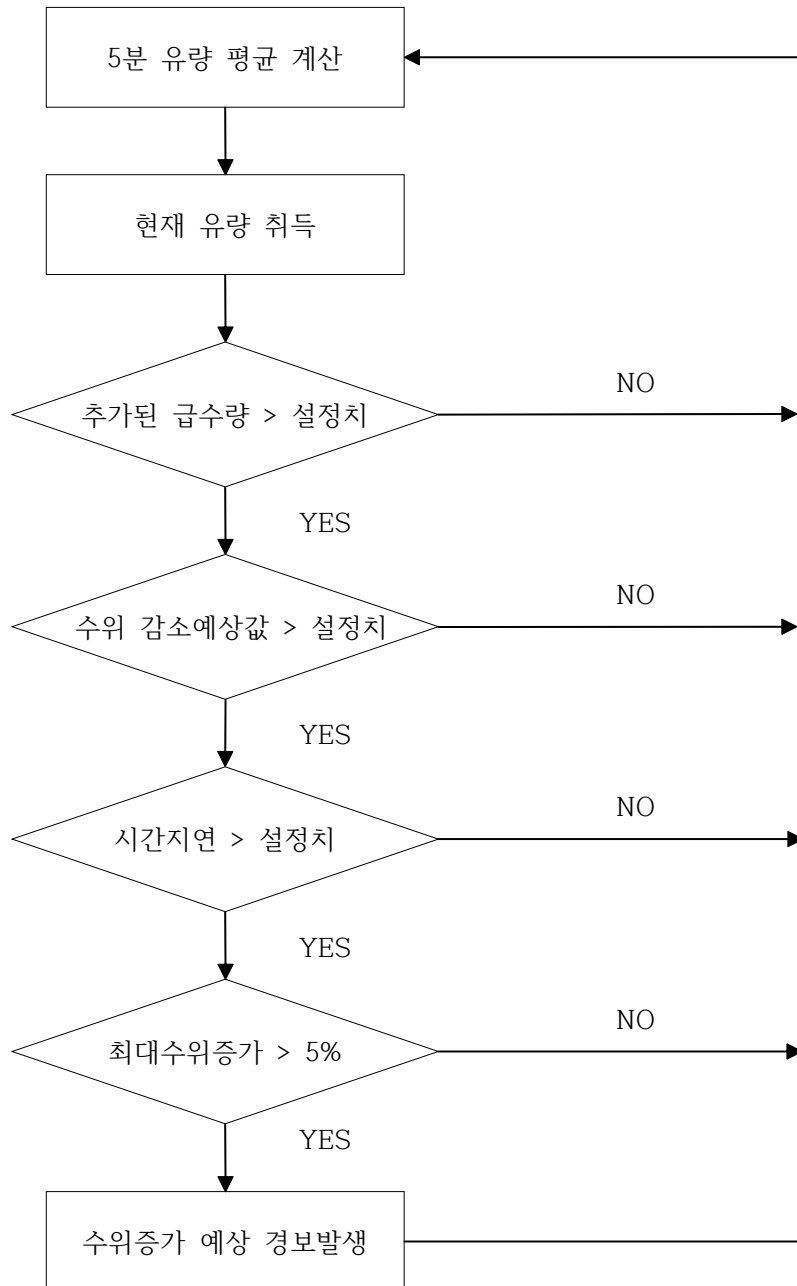
#### 가. 적용 방법 예시

- (1) 현재 안정된 수위(50%)를 유지하고 있는 급수유량을 현재 정상유량으로 설정한다.  
예) 과거 5분 평균 유량 0.22Mkg/hr 으로 설정
- (2) 정상 유량을 상회하는 급수유량 변경이 일어나면 급수량과 시간에대하여 적산 실시  
예)유량이 0.3Mkg/hr으로 변경되고 1분간 계속 유지됨 (추가주입량 : 1700kg)
- (3) 추가 주입된 급수량에 대해 분석 모델을 적용하여 최대 수위 변화값 계산  
예) 최대 수위변화 : 약 6%
- (4) 분석모델의 최대 수위 변화값이 증기발생기 편차 경보값 (+5%) 초과시 경보 발생
- (5) 운전원 급수유량 감소 조치로 증기발생기 수위제어 과도 상태 예방.



## 나. 적용 방법 관련 플로우 차트 작성

가.항에서 적용하였던 방법에 대해서 플로우 차트를 작성하면 아래와 같다. 수위 감소 예상값 및 시간 지연에 대한 조건식은 필요시 선택적으로 사용 한다.



## 제 7 장 결 론

원자력 발전소 저출력 기간중 운전원 수동운전시 증기발생기 저온급수 과다 공급에 의한 수위 과도 상태는 빈번히 발생해 왔다. 본문에서는 증기발생기 고유 데이터를 참조하여 증기발생기 수위 분석 모델을 수립 후 급수 온도 및 질량 변화에 대한 수위 응답에 대하여 분석을 실시하였다. 기존에는 증기발생기에 저온급수 공급시 수축현상이 발생하며, 급수온도가 낮을수록 그리고 급수량이 많을수록 수위 변화가 심해 제어가 어렵다는 막연한 지식을 가지고 있었다. 이번 분석을 통하여 저온 급수 공급시 수위 응답에 대하여 열역학 수식을 적용하여 수위 감소량 및 수위 증가시간, 수위 증가량에 대해 계산을 실시 함으로써 정량적 판단기준을 세웠다. 그리고 실제 운전경험에 대하여 분석 모델을 적용후 실제 증기발생기 수위 응답과 비교를 수행하여 지연시간 및 실제 수위 변동량에 대한 적용 가능성 여부를 확인하였다.

증기발생기에 저온 급수 공급으로 수축현상 발생시 수위 증가는 미래 시점에 발생하게 된다. 운전원이 미래를 예측하여 운전하기에 어려움이 있는 만큼 보조장치로서 본 수위 분석 모델을 발전소 정보시스템에 결합 적용함으로써 실제 급수 유량 증가에 따른 사전경보 시스템 개발을 시도해 볼 수 있다. 운전원이 제어에 수동 개입후 수위 수축현상이 발생 하였을때 선제적으로 과도한 증기발생기 수위 변화에 대해 미리 알림을 준다면 발전소 안전 운전에 많은 도움을 줄수 있다.

향후 남겨진 과제로서 본문에서 수행한 단순한 순간적인 급수 공급에 대한 증기발생기 수위 변화 분석을 넘어, 시간을 경과하여 변화된 급수 공급에 대한 수위 응답에 대하여 실시간 변화를 예측 할수 있는 연구 수행과 발전소 정보 시스템과 결합된 수위 예측 프로그램 개발을 기대해 본다.

## 붙임 1. WH 증기발생기 고유 항목

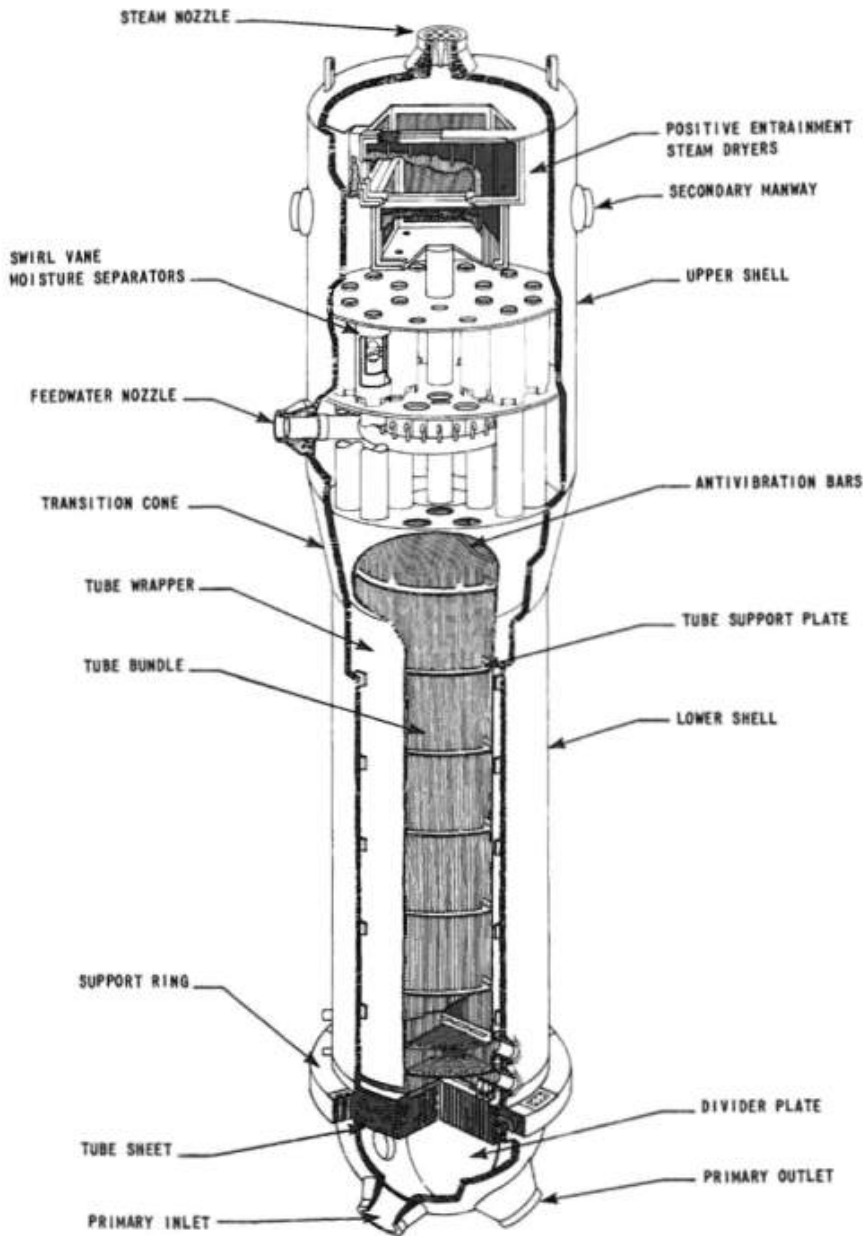


그림 붙임 1-1 WH 증기발생기 <sup>5)</sup>

5) 출처 : <https://www.nrc.gov/docs/ML1233/ML12339A721.pdf> 7page

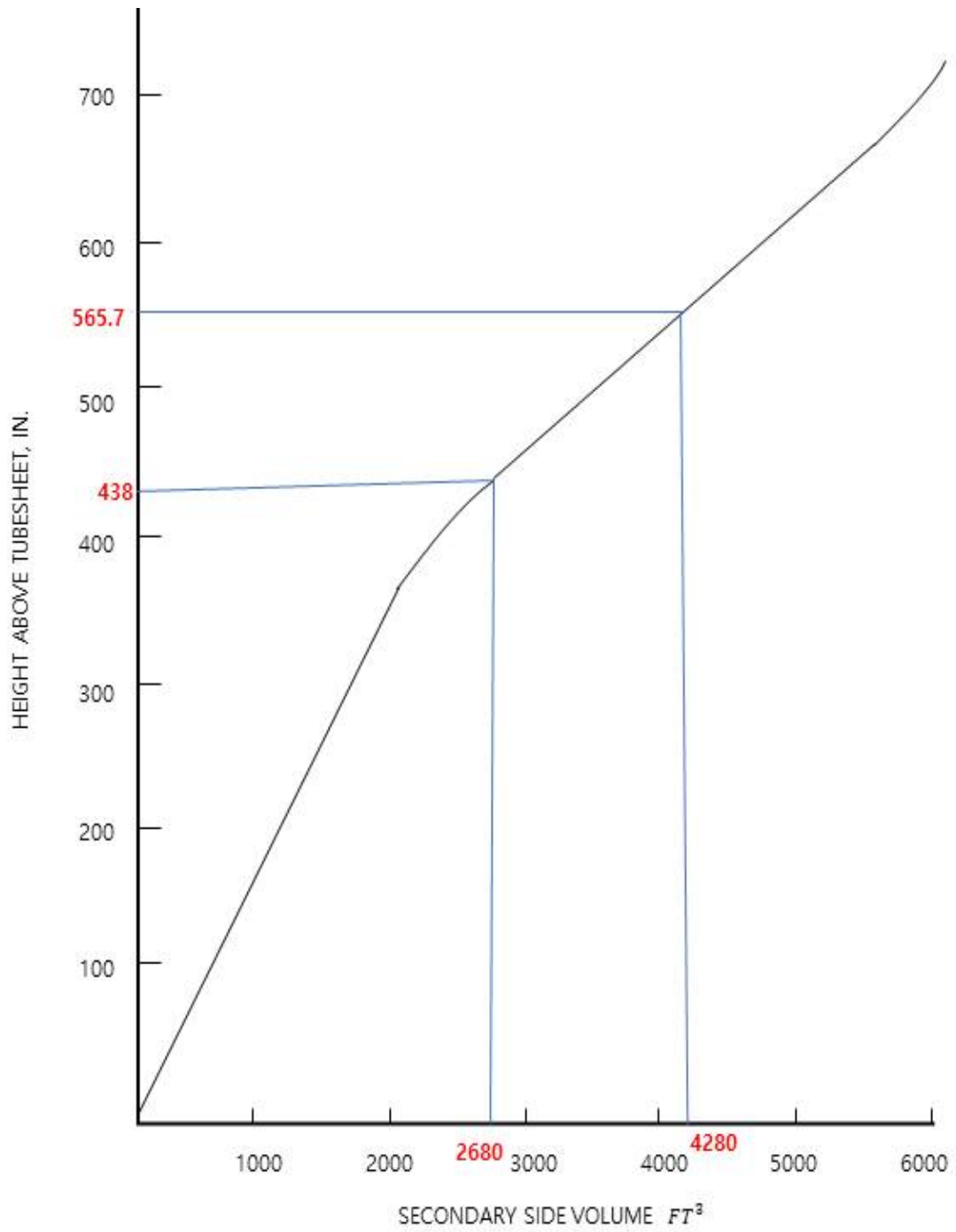


그림 붙임 1-2 증기발생기 수위에 따른 체적

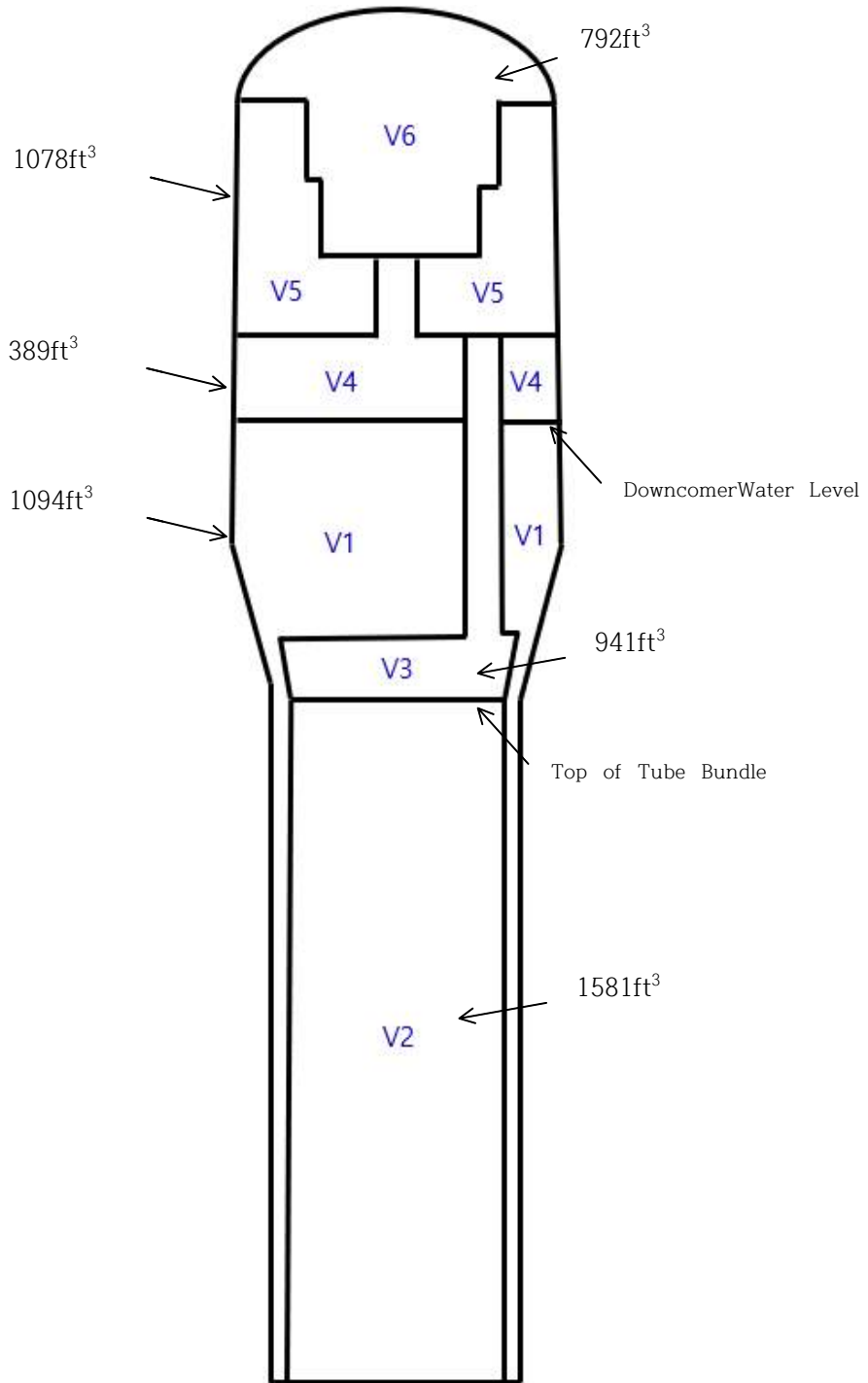


그림 붙임 1-3 증기발생기 구획 별 볼륨

Region	액체체적 (ft <sup>3</sup> )	증기체적 (ft <sup>3</sup> )	총 체적 (lb)	액체질량 (lb)	증기질량 (lb)	총 질량 (lb)
1	1093.62	0	1093.62	53011	0	53011
2	726.30	854.22	1580.52	33844	1859	35703
3	139.24	801.59	940.82	6488	1725	8213
4	28.00	360.94	388.94	1305	777	2082
5	34.61	1043.43	1078.04	1613	2247	3860
6	0	793.39	792.39	0	1706	1706
<b>Total</b>	<b>2021.77</b>	<b>3852.56</b>	<b>5874.33</b>	<b>96261</b>	<b>8314</b>	<b>104575</b>

표 붙임 1-1 전출력 조건에서 구획별 체적 및 유체질량

위 치	높 이 (in.)
Normal water level	502.0
Lower wide range level tap	7.75
Upper wide range level tap	565.76
Upper narrow range level tap	565.76
Lower narrow range level tap	438.88

표 붙임 1-2 정상 수위 및 수위 측정탭 위치

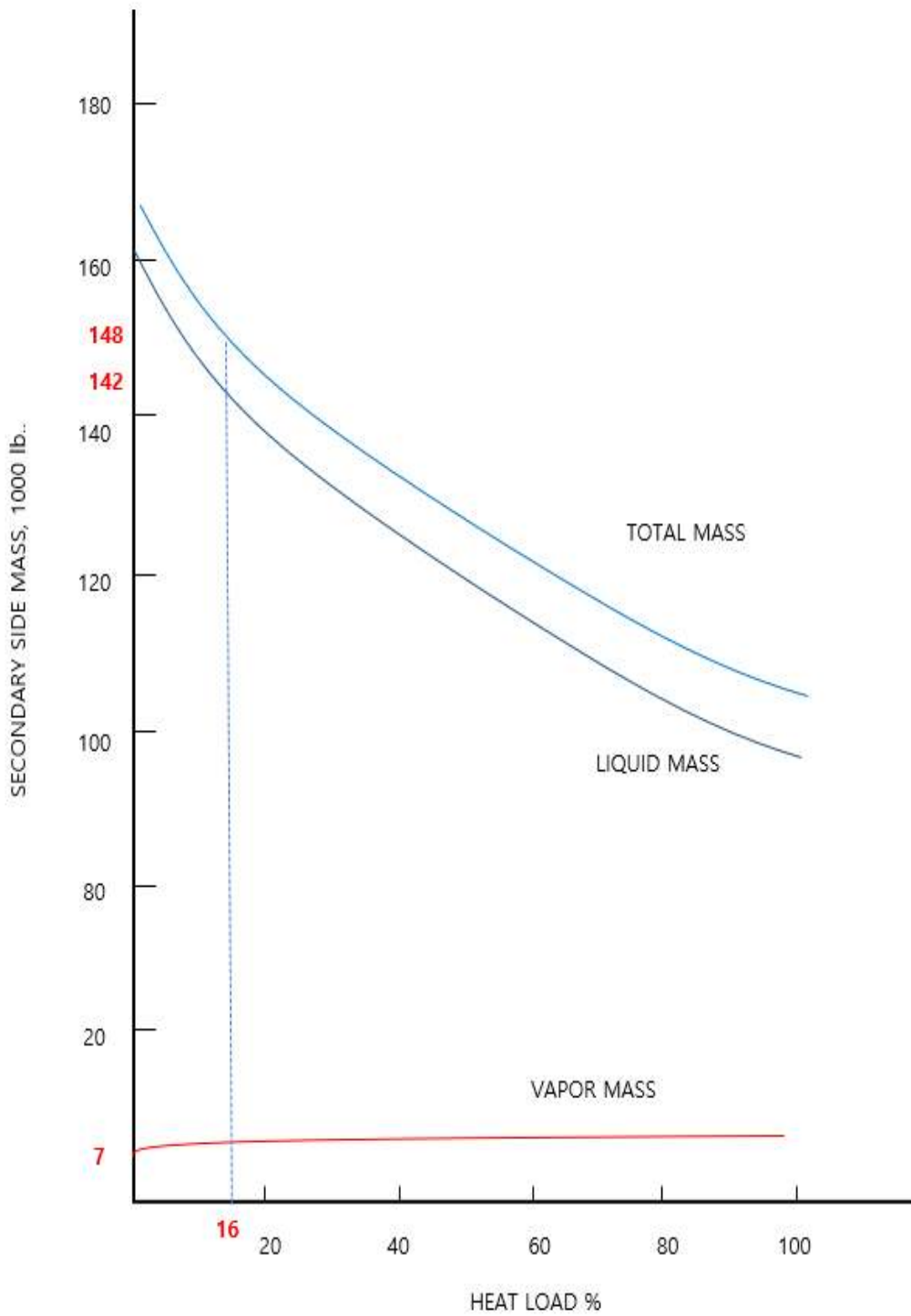


그림 붙임 1-4 출력별 증기발생기 2차측 유체질량

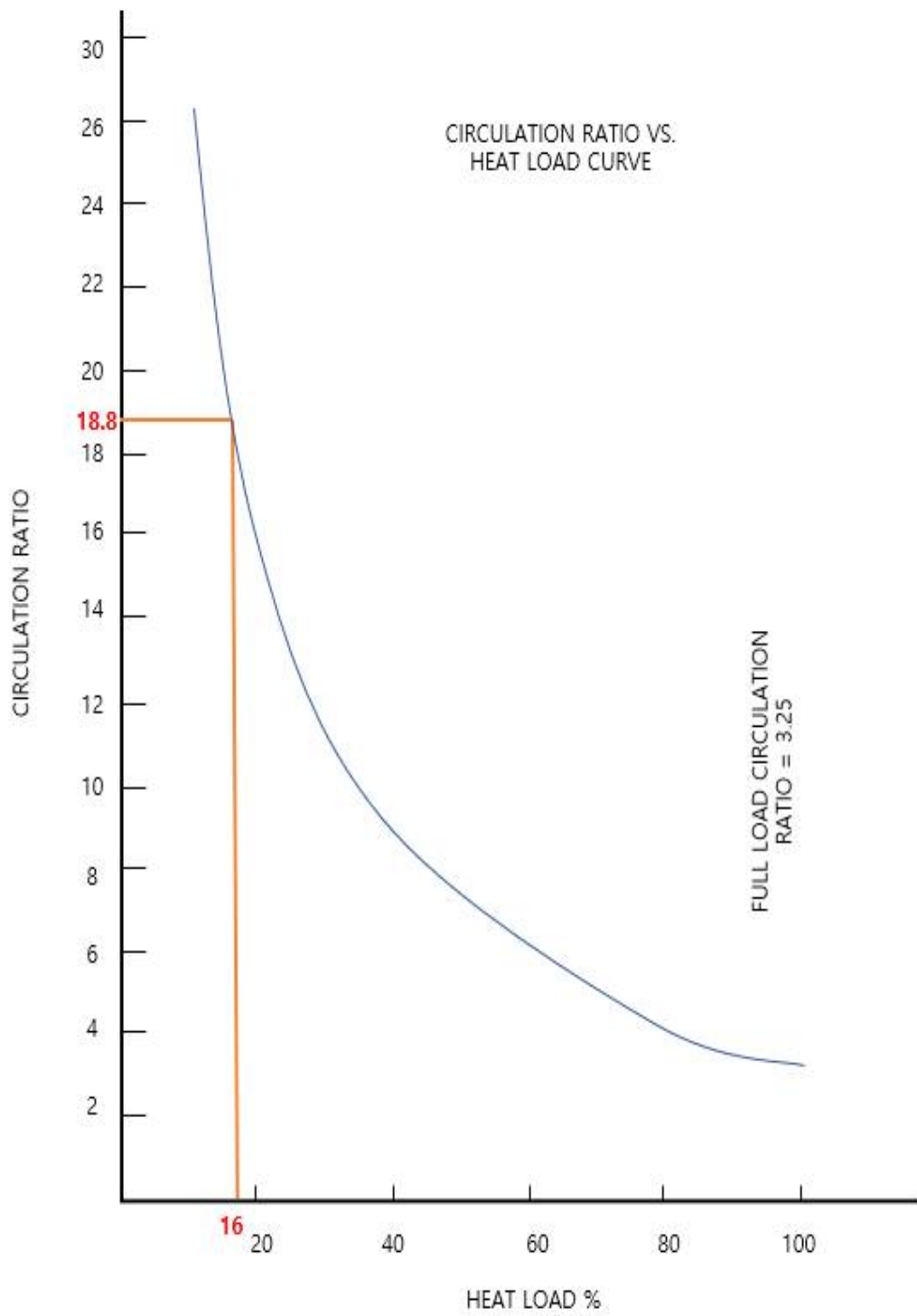


그림 붙임 1-5 순환비



## 붙임 2. IAPWS-IF97관련 사용프로그램 설명

본문에서는 필요시 상태값 계산을 위하여 python 프로그램을 작성하고 내부에서는 IAPWS-IF97기능을 구현한 freesteam-2.1 라이브러리를 사용하였다. 라이브러리에서 제공하는 속성 및 일부 함수 기능은 아래와 같다.

### 1. freesteam 2.1에서 제공하는 속성 값

p	Pressure
T	Temperature
h	Enthalpy
s	Entropy
cp	Isobaric heat capacity
cv	Isochoric heat capacity
v	Specific volume
rho	Density
u	Internal energy
x	Quality (when saturated)
k	Thermal conductivity
mu	Dynamic viscosity
w	Speed of sound
region	IAPWS-IF97 region

### 2. freesteam 2.1에서 제공하는 주요 함수

Tsat_p( p )	: 압력을 이용하여 포화 온도 취득
psat_T(T)	: 온도를 이용하여 포화 압력 취득
steam_pT( p, T )	: 압력과 온도를 사용하여 속성 취득
steam_ph( p, h )	: 압력과 엔탈피를 사용하여 속성 취득
steam_pu( p, u )	: 압력과 내부에너지를 사용하여 속성 취득
steam_ps( p, s )	: 압력과 엔트로피를 사용하여 속성 취득
steam_pv( p, v )	: 압력과 비체적을 사용하여 속성 취득
steam_Ts( T, s )	: 온도와 엔트로피를 사용하여 속성 취득
steam_Tx( T, x )	: 온도와 건도를 사용하여 속성 취득

### 3. IAPWS-IF97 구역(Region) 구분

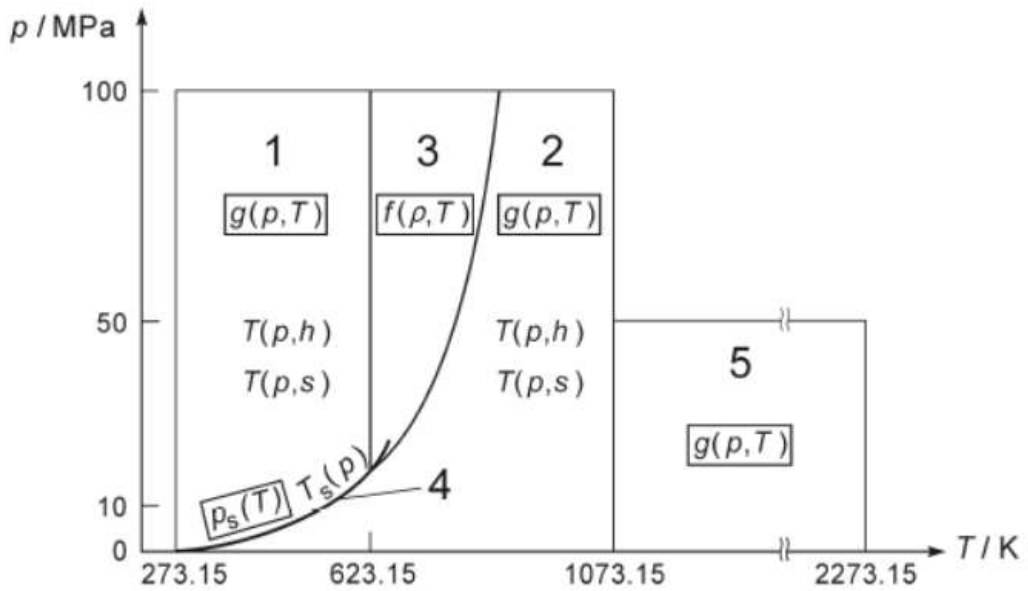


그림 붙임2-1 Regions and equations of IAPWS-IF97 <sup>6)</sup>

구역 1 : 온도 623.15 K 이하의 과냉 액체 구역

구역 2 : 온도 1073.15 K 이하의 과열 증기 구역

구역 3 : 구역 1과 구역 2 사이의 과냉 액체 및 과열 증기 구역

구역 4 : 포화 구역

구역 5 : 온도 1073.15 K 와 2273.15 K 사이의 과열 증기 구역

구역 1, 2 및 3은 최대 압력이 100 MPa이고, 구역 5는 최대 압력이 50 MPa

6) 출처 : [http://www.engsoft.co.kr/Software/Software\\_Frame\\_k.htm](http://www.engsoft.co.kr/Software/Software_Frame_k.htm)

## 참고문헌

1. Assessment of PWR Steam Generator Modelling in RELAP5/MOD2  
(U.S. Nuclear Regulatory Commission)
2. MODEL F STEAM GENERATOR THERMAL-HYDRAULIC DATA REPORT  
(WNEP-8316)
3. Thermal-Hydraulic Evaluation of KGA,KHB, KSR and KTR Steam Generators to  
Support a 4.5% Uprate Program (2005 Westinghouse Electric Company LLC )
4. REPORT OF DR, DAVID J. DUQUETTE IN SUPPORT OF CONTENTION  
NYS-38/RK-TC-5 ( NRC )
5. 원전 2차 계통 실시간 성능감시 시스템(R-PAS)
6. 원전 2차 계통 정밀 열성능진단 (에너지)
7. 원자력계통기초Ⅱ(표준형) : 한국수력원자력(주) 원자력교육원
8. 저출력 및 과도상태시 원전 증기발생기 수위제어에 관한 연구  
(한국지능시스템 학회 1993)
9. 저출력시 증기발생기 수위 자동제어 논리 개발 (KAERI 1993)
10. 증기발생기 출력 분석 (한국수력원자력)
11. MKS 단위 증기표 : 온도 기준 및 압력 기준 (Engsoft.com)
12. MKS 단위 증기표 : 과열 증기 및 압축 수 성질 (Engsoft.com)
13. IAPWS-IF97 구역 구분 (Engsoft.com)
14. freesteam Website