

# 원자력발전소 증기발생기 수위 제어에 관한 연구

문병희\*, 최흥규\*\*

한국전력공사 전력연구원\*, 홍익대학교\*\*

## A Study on The Steam Generator Level Control for Nuclear Power Plant

Byung-Hee Moon\*, Hong-Kyoo Choi\*\*

Korea Electric Power Research Institute\*, Hong-Ik University\*\*

### ABSTRACT

About a half of Electric power is generated by nuclear power plants in Korea. So, the stable operation of nuclear power plant is very important for supplying the essential national electric power.

A S/G(Steam Generator) level control is the most difficult system in PWR(Pressurized Water Reactor) nuclear power plant.

Because of the non-linear and the non-nominal response of S/G level control, it is very difficult to control the level by automatic mode or manual mode.

The goal of this study is to establish and verify a advanced control algorithm by analyzing, modelling, stability calculation, controller parameter calculation, simulation for S/G level control system.

### 1. 서론

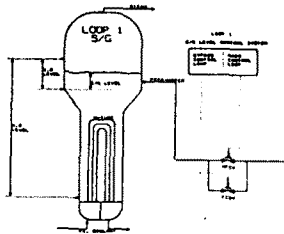
원자력발전소 제어계통중 운전 정지에 많은 영향을 주고 제어하기 가장 까다로운 것은 증기발생기 수위 제어계통으로 특히 가압경수로형(PWR) 발전소의 경우 기동시 및 저출력시에 자동제어는 물론 수동제어도 매우 어려운 상태에서 운전원에게 많은 부담을 주고 있는 실정이다. 본 연구의 목적은 증기발생기 수위특성을 분석하고 모델링하여 안정성이 보장되고 수학적으로 증명된 보다 나은 제어 알고리즘을 도출해서 증기발생기 수위 제어 계통의 제어 방법을 개선하고 제어 성능과 신뢰도를 향상시킬 수 있는 방안을 제시하는데 있다.

### 2. 원자력발전소 증기발생기 수위

가. 증기발생기 (S/G: Steam Generator) 가압경수로형(PWR)의 원자력발전소에서는 원자로내의 우라늄이 핵분열시 발생하는 열로 1차계통의 물을 가열한후 가열된 1차계통 물이 증기발생기내에서 2차계통인 급수를 가열하여 증기를 발생시키도록 되어 있다.

#### 나. 증기발생기 수위 제어 현황

(1) 수위측정 및 유지 증기발생기 수위측정은 증기발생기 내부의 대부분을 측정 대상으로 하는 광역수위(Wide Range Level)와 주요 운전부분을 측정 대상으로 하는 협역수위(Narrow Range Level)로 나누어지며 광역수위 측정 범위는 약 1420[cm] 정도이고 협역수위는 약 325[cm] 정도이다. 일반적으로 증기발생기 수위라 함은 협역수위를 말한다.

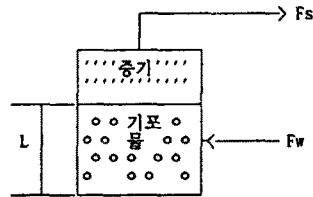


[그림 1] 증기발생기 수위 제어

(2) Swell 및 Shrink 현상 발전소 운전중 갑작스런 증기유량의 증가로 증기압이 감소하면 물속의 증기량이 늘어나서 수위가 증가하는데 이런 현상을 Swelling이라 하며 반대로 증기유량의 감소로 증기압이 증가하면 기포량이 줄어들어 수위는 감소하는데 이런 현상을 Shrinking이라 한다.

(3) 급수온도의 영향 증기발생기에 공급되는 급수의 온도가 낮을 경우에는 수위가 저하되어 급수유량을 증가시키도 수위가 증가하는 것이 아니라 낮은 온도의 급수가 증기발생기내의 물을 용출시켜 수위는 오히려 감소하며 계속된 급수의 증가에도 수위가 증가하지 않다가 공급된 급수가 가열된후 수위가 증가하기 착하여 급수유량을 감소시키더라도 수위는 이미 공급된 급수증기량 만큼 계속 증가한다. 즉 급수온도가 낮으면 조작기의 조작량과 제어변수의 행동이 비정상적인 불리현상을 보이므로써 제어가 어려운 제어 대상이다.

### 3. 증기발생기 수위 제어 모델링



[그림 2] 증기발생기 수위 Block Diagram

증기발생기의 급수유량 Fw와 증기유량 Fs 차에 의한 물의 질량변화는

$$\frac{dM}{dt} = F_w - F_s$$

이고, 부피는 질량 M과 기포량 Vs에 따라 변화하므로

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{dM}{dt} + \frac{dV_s}{dt}$$

이 된다. 수위변화는 부피변화에 비례하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dL}{dt} = K_s \frac{dV}{dt}$$

$$\frac{dL}{dt} = \frac{K_s}{\rho} \frac{dM}{dt} + K_s \frac{dV_s}{dt}$$

이것을 정상상태의 수위 변화분과 기포에 의한 과도상태의 수위 변화분으로 나누어 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dL_s}{dt} + \frac{dL_d}{dt}$$

질량변화에 의한 수위변화분 Ls만 고려하면

$$\frac{dL_s}{dt} = \frac{K_s}{\rho} \frac{dM}{dt} = \frac{K_s}{\rho} (F_w - F_s)$$

가 되고, 여기서

$$G1 = \frac{K_s}{\rho}, \quad Fer = F_w - F_s \text{ 라 하면}$$

$$\frac{dL_s}{dt} = G1 \cdot Fer$$

이 되고, 이것을 Laplace 변환식으로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$Ls(S) = \frac{G1}{S} \cdot Fer(S)$$

저은 급수 및 기포에 의한 수위변화분 Ld는

$$\frac{dL_d}{dt} = -\frac{1}{\tau^2} (G2 \cdot Fer - L_d)$$

$$Ld(S) = -\frac{G2}{1 + \tau^2 S} \cdot Fer(S)$$

전체적인 증기발생기 수위 변화는

$$L(S) = Ls(S) + Ld(S)$$

로 나타낼 수 있으므로

$$L(S) = \left( \frac{G1}{S} - \frac{G2}{1 + \tau_2 S} \right) \cdot Fer(S)$$

$$= G1 \cdot \frac{1 - \left( \frac{G2}{G1} - \tau_2 \right) S}{S \cdot (1 + \tau_2 S)} \cdot Fer(S)$$

이 된다.

여기서,  $\tau_1 = \frac{G2}{G1} - \tau_2$  라 하면

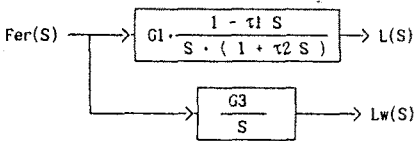
$$L(S) = G1 \cdot \frac{1 - \tau_1 S}{S \cdot (1 + \tau_2 S)} \cdot Fer(S)$$

로 표현할 수 있다.

그러나 증기발생기 관역 수위 변화는 질량변화에 비례하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{cLw}{ct} = G3 \cdot Fer$$

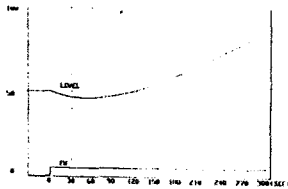
$$Lw(S) = \frac{G3}{S} \cdot Fer(S)$$



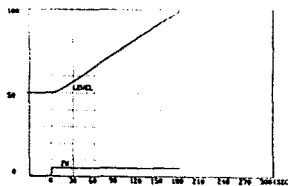
[그림 3] 증기발생기 수위 모델

#### 4. 증기발생기 수위 제어 특성

가. 증기발생기 수위 특성  
발전소 기동시 계통병입전 급수온도가 낮을 때의 증기발생기 수위 응답과 계통병입후 급수온도가 증가했을 때의 증기발생기 수위 응답 특성 변화는 대개 다음과 같다.



[그림 4] 급수온도가 낮을 때의 수위 특성



[그림 5] 급수온도가 높을 때의 수위 특성

나. 증기발생기 수위 제어 LOOP 안정도 판별식  
기동시에 사용되는 BYPASS VALVE CONTROL LOOP의 전달함수만 생각하면 Controller의 전달함수는 다음과 같다.

$$Co(s) = Kp \left( 1 + \frac{1}{Ti S} \right)$$

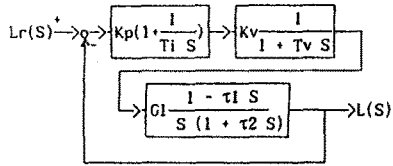
Co(s) : Controller Output  
Kp : Controller Proportional Gain  
Ti : Controller Reset Time

Bypass V/V의 변화에 대한 급수유량의 변화를 간단히 1차 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{Fw(S)}{Co(S)} = \frac{Kv}{1 + Tv S}$$

Kv : 제어밸브의 유량계수  
Tv : 제어밸브의 시정수

증기유량이 일정하다고 가정하고 급수유량에 의한 수위 변화만을 고려한 CLOSED LOOP BLOCK은 다음과 같다.



[그림 6] 증기발생기 수위제어 BLOCK DIAGRAM

이 CLOSED LOOP를 전달함수로 표현하면

$$\frac{L(S)}{Lr(S)} = \frac{G(S)}{1 + G(S)}$$

이 된다. 여기서 종합 전달함수 G(S)는 다음과 같다.

$$G(S) = Kp \left( 1 + \frac{1}{Ti S} \right) \cdot Kv \cdot \frac{1}{1 + Tv S} \cdot G1 \cdot \frac{1 - \tau_1 S}{S (1 + \tau_2 S)}$$

$$= Kp \cdot Kv \cdot G1 \cdot \frac{\left( 1 + \frac{1}{Ti S} \right) (1 - \tau_1 S)}{S (1 + Tv S) (1 + \tau_2 S)}$$

NYQUIST 안정도 판별식 G(jw)는 다음과 같다.

$$G(jw) = Kp \cdot Kv \cdot G1 \cdot \frac{\left( 1 + \frac{1}{Ti jw} \right) (1 - \tau_1 jw)}{jw (1 + Tv jw) (1 + \tau_2 jw)}$$

$$= Kp \cdot Kv \cdot G1 \cdot \frac{\left( -\tau_1 - \frac{1}{w^2 Ti} \right) + j \left( \frac{\tau_1}{Ti} - 1 \right)}{1 - w^2 Tv \tau_2 + jw (Tv + \tau_2)}$$

가 되어 주파수 전달함수는

$$G(jw) = Kp \cdot Kv \cdot G1 \cdot (Re + j Im)$$

으로 표현할 수 있다.

다. 기존 증기발생기 수위 제어기의 안정도 분석  
기동시 부터 계통병입 전후에 운전되는 Bypass Control Loop에 대한 안정도를 분석한다.  
급수유량 변화에 따른 수위변화 계수는

$$G1 = 0.058 \left[ \frac{\%}{\%Flow} \right]$$

FCBV변화에 대한 급수유량 변화 계수와 시정수는

$$Kv = 0.3 \left[ \frac{\%Flow}{\%} \right]$$

$$Tv = 3 \left[ \text{Sec} \right]$$

PI Controller 상수는 설계값인

$$Kp = 4.8$$

$$Ti = 750 \left[ \text{Sec} \right]$$

등으로 고정 상수로 하고, 다른 파라미터는 급수온도에 따라서 다음과 같이 적용한다.

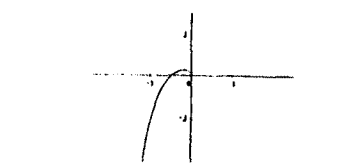
- 급수온도 Tw = 40 [°C]일 때 :  
 $\tau_2 = 118.7 \left[ \text{Sec} \right], \tau_1 = 48.0 \left[ \text{Sec} \right]$

- 급수온도 Tw = 180 [°C]일 때 :  
 $\tau_2 = 7.60 \left[ \text{Sec} \right], \tau_1 = 3.48 \left[ \text{Sec} \right]$

위의 파라미터에서 제어기가 설계값으로 운전될 때 수위 제어 계통의 안정도를 분석하기도 한다.  
주파수 w를 0에서 부터 ∞까지 변화 시키면서 G(jw)의 궤적을 그리면 다음과 같다.



[그림 7] 급수온도 Tw = 40 [°C]일 때



[그림 8] 급수온도 Tw = 180 [°C]일 때

그림 7의 궤적에 나타나는 바와 같이 계통병입전 급수온도가 낮을 경우에는 현재의 제어 파라미터로는 불안정 상태가 되어 자동운전이 불가능함을 알 수 있다.

그러나 그림 8에서와 같이 급수온도가 증가하면 똑같은 제어 파라미터에서도 제어계통이 안정 상태임을 알 수 있다.

