

# 증기발생기 수위제어를 위한 자기동조 퍼지 PID 제어기 개발

論 文  
48A - 10 - 11

## Development of a Self-tuning Fuzzy-PID Controller for Water Level of Steam Generator

韓進旭\* · 李昌求\*\* · 韓后錫\*\*\*  
(Jin-Wook Han · Chang-Goo Lee · Hoo-Seuk Han)

**Abstract** - The water level control of a steam generator in the nuclear power plant is an important process. Most of the water level controllers of the actual plant are PID controllers. But they have limitations in applying for tracking the set point and getting rid of disturbances, so there are some defects to apply in the actual ground even though many research works represented the resolutions to solve it. In this paper, it is suggested that the established simple PID controller in low power has the ability to remove disturbances and trace the set-point, and then possesses the real-time self-tuning function according to the variety of moving peculiarity of a plant. This function realized by making use of fuzzy logic. PID parameters are formulated by a variable  $\alpha$  and made it fluctuate by a fuzzy inference according to level error and level error change. This mechanism makes application of actual plant effective as well as taking advantage of improving the efficiency of water level controller by way of adding the function of self-tuning instead of replacing PID controller. The computer simulation of this scheme shows the improved performance compare to conventional PID controller.

**Key Words** : Self-tuning, Steam generator, PID(Proportional Integral Derivative) controller

### 1. 서 론

현재에 우리나라는 발전량의 50% 이상을 원자력 발전에 의존하고 있으며 이 비율은 앞으로 더욱 커질 것이므로 안전성 향상과 원자력 기술 자립을 위하여 계속적인 연구가 필요하다. 증기발생기의 수위제어는 원자력 발전소를 안정적으로 운전하는데 중요한 요소이나 급수유량 및 온도, 증기유량, 냉매온도 등에 따라 응축과 팽창 현상이 발생하여 제어하기가 매우 어려운 공정이다[1-3]. 특히, 저부하 운전시에 원자로 출력을 안전하게 추종하면서 적정 수위를 유지하는 것이 중요하며 숙련된 운전원의 지식이 필요하다. 증기발생기의 수위제어를 위한 제어기로 PID 제어기가 널리 사용되고 있으나 외란 제거와 설정치 추종 능력에 한계가 있고, 동특성 변화에 따른 자동동조 기능이 없어 성능이 떨어진다. 최근에 퍼지논리, 인공회로망 이론 등을 이용하여 숙련된 운전자의 운전지식을 제어기에 접목하거나 제어대상에 대한 정확한 모델링을 제공하여 수위제어의 성능향상에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나 그 대부분이 이론에 그치고 현장에 적용되지 못하고 있다[4-6].

이와 같은 이유중의 하나는 증기발생기의 수위제어 공정 전반에 걸친 안정성에 대한 고려가 없었고 기존 수위제어설

비를 교체하여야 한다는 점을 들 수 있다. 이러한 문제점을 해결하면서 수위제어의 성능을 향상시킬 수 있는 방법은 현재 운전중인 PID 제어기 설비를 그대로 운용하면서 여기에 현장운전자의 운전지식을 접목시키는 것이다. 즉, 안전장치, 수동 조작, 응급복구 기능 등을 갖춘 기존의 증기발생기 수위 제어시스템 설비를 그대로 이용하면서 여기에 외란제거 능력과 동특성 변화에 따른 자기동조 기능을 부여한다.

본 논문에서는 퍼지논리를 이용하여 저출력에서 기존의 단순 PID제어기로 하여금 외란제거와 설정치 추종능력을 보유토록 하고, 플랜트의 동특성 변화에 따라 실시간 자기동조 기능을 갖도록 하였다. 이를 위해 PID 제어계수를 Ziegler-Nichols동조식에 따라 하나의 계수  $\alpha$ 에 의하여 등식화하고 제어오차와 오차변화량에 따라 퍼지추론에 의하여 이를 증감하도록 하였다[7]-[9]. 이와같은 구조는 이미 현장에서 운용되고 있는 증기발생기 수위제어용 PID 제어시스템을 교체하지 않고 이에 자기동조 기능을 제공함으로써 성능향상을 도모할 뿐만아니라 현장 적용을 용이하게 한다.

### 2. 증기발생기 모델

증기 발생기 모델은 제작회사에 따라 프랑스 원전 모델, 어빙(Irving) 모델, 웨스팅하우스 모델 등이 제시되고 있다. 프랑스 원전 모델은 증기발생기의 입력변수로 급수유량과 증기유량을 사용하였으며 모델계수는 출력 및 급수 온도의 함수로 표시한다. 어빙 모델은 증기발생기의 입력변수로 급수유량과 증기유량 두가지를 사용하였으며 모델 계수는 출력의 함수로 표시한다. 본 논문에서는 현재 고리 3, 4호기와 영광

\* 正 會 員 : 全北大 工大 電子工學科 博士課程

\*\* 正 會 員 : 全北大 工大 電子情報工學部 副教授

\*\*\* 正 會 員 : 全北大 工大 醫用生體工學科 博士修了

接受日字 : 1999年 1月 12日

最終完了 : 1999年 9月 17日

1, 2호기에 설치 운영하고 있는 857MW급 웨스팅하우스 모델을 선정하였다. 본 모델은 그림 1과 같이 입력변수는 급수유량( $W_f$ ), 증기유량( $W_s$ ), 1차측 냉매온도( $T_p$ )와 급수온도( $T_f$ ) 4개의 변수로 정의하고 이들 변수의 영향에 의해 증기발생기의 수위(L)가 변하는 것으로 하였다. [10]-[11]

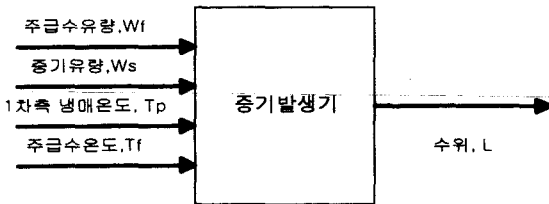


그림 1 증기발생기 모델의 입출력 변수

Fig. 1 In-output variables of steam generator model

입력변수들의 관계는 (1)과 같은 MISO 시스템으로 나타낼 수 있다. 이 모델에서 각각의 입력변수에 따른 출력을 얻기 위하여 입력변수 사이에 서로 간섭이 없다고 가정하고 수위 변화를 보면 각각의 전달함수에 대한 출력이 발생초기에 비최소위상 시스템 특성을 보이며, 특히 저출력시에 이러한 현상이 두드러진다.

$$L(s) = [G_1(s) \ G_2(s) \ G_3(s) \ G_4(s)] \begin{bmatrix} W_f(s) \\ W_s(s) \\ T_p(s) \\ T_f(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

급수유량( $W_f$ )에 대한 수위변화는  $W_f$ 를 계단형태로 증가시키면 입력의 적분결과 선형으로 증가할 것이지만 수축현상을 고려하여 (2)와 같다. 여기에서 사용하는 매개변수와 상수들은 Power변화에 따른 함수이다[3]-[6].

$$G_1(s) = \frac{k_1}{s} + \frac{k_2 w_m^2}{s^2 + 2\zeta_1 w_m s + w_m^2} \quad (2)$$

여기에서,

$$\begin{aligned} k_1 &= 1.1 \times 10^{-4} \\ k_2 &= -0.012097 e^{-0.09067p} - 0.001 \\ t_{p1} &= 196.37 e^{-0.1245p} + 30 \\ \zeta_1 &= 0.1985 e^{0.03p} \\ w_m &= \frac{3.141592}{t_{p1} \sqrt{1 - \zeta_1^2}} \quad \text{이다.} \end{aligned}$$

증기유량( $W_s$ )에 대한 수위의 변화는 급수유량의 경우와 마찬가지로  $W_s$ 를 계단 증가시키면 수위는 선형감소할 것이나 팽창 현상에 의한 수위의 변화도 고려하여 (3)과 같다.

$$G_2(s) = -\frac{k_1}{s} + \frac{0.05 k_3}{s + 0.05} \quad (3)$$

여기에서  $k_3 = 0.0196 e^{-0.0735p} + 0.007$  이다

또한, 1차측 냉매온도( $T_p$ )와 주급수온도( $T_f$ )에 의한 수위의 변화는 각각 (4), (5)와 같다.

$$G_3(s) = \left[ \frac{k_4(a_3 - b_3)s}{(s + a_3)(s + b_3)} \right] e^{-d_3 s} \quad (4)$$

여기에서,

$$\begin{aligned} k_4 &= 1.17 \times 10^{-5} p^3 - 6 \times 10^{-4} p + 0.01 p + 0.0223, \quad p \leq 25 \\ &= \frac{0.0801 - 0.0004(p - 25)}{-2 \times 10^{-7} p + 1.1 \times 10^{-5} p^2 + 2.7 \times 10^{-4} p + 0.0041}, \quad p > 25 \\ &= \frac{2.58 \times 10^{-4}(p - 50) + 0.0201}{0.0195 p + 0.0846}, \quad p \leq 10 \\ &= \frac{0.0107 p + 0.1725}{0.0080 p + 0.21}, \quad 10 < p \leq 15 \\ &= \frac{0.0125 p + 0.124}{0.0125 p + 0.124}, \quad 15 < p \leq 20 \\ &= \frac{a_3}{10}, \quad 20 < p \\ a_3 &= 0.0195 p + 0.0846, \quad p \leq 10 \\ &= 0.0107 p + 0.1725, \quad 10 < p \leq 15 \\ &= 0.0080 p + 0.21, \quad 15 < p \leq 20 \\ &= 0.0125 p + 0.124, \quad 20 < p \\ b_3 &= \frac{a_3}{10} \\ c_3 &= 0.001 p, \quad p \leq 5 \\ &= 0.399 p^{-1.99}, \quad 5 < p \leq 10 \\ &= 2.0, \quad 10 < p \\ d_3 &= 2 \quad \text{이다.} \end{aligned}$$

$$G_4(s) = \frac{k_6 w_m^2}{s^2 + 2\zeta_4 w_m s + w_m^2} \quad (5)$$

여기에서,

$$\begin{aligned} k_6 &= 4.43 \times 10^{-4} e^{0.0348p} \\ t_M &= 195 e^{-0.16p} + 22 \\ \zeta_4 &= 0.535 e^{-0.16p}, \quad p \leq 15 \\ &= 0.172, \quad p > 15 \\ w_m &= \frac{3.141592}{t_M \sqrt{1 - \zeta_4^2}} \quad \text{이다.} \end{aligned}$$

그림 2는 각각 다른 Power에서 주 급수유량, 증기유량, 냉매온도, 급수온도의 계단 변화에 따른 수위변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 입력변수 변화로 발생하는 용축과 팽창현상에 의한 수위의 영향은 저출력일 때가 고출력일 때보다 민감함을 알 수 있다. 기존의 수위제어기는 고출력 운전시에는 어느정도 안정된 제어가 가능하나 저출력 운전시에는 외란 등 주변환경에 적응성이 없어 운전원에 의한 수동조작에 의존할 수밖에 없었다. 따라서 본 논문에서는 저출력 영역에서 제어입력 변화와 외란에 대하여 강인하고 적응성을 갖는 제어기를 설계하고 선정된 모델에 적용 실험하였다.

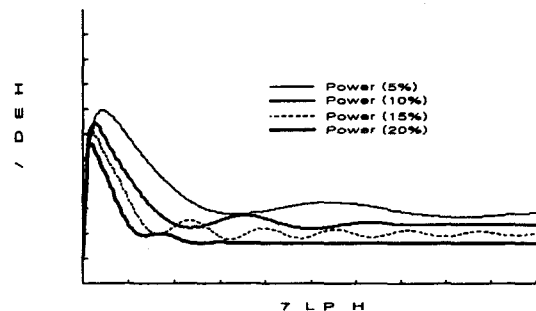


그림 2  $\Delta W_f = 8 \text{ kg/s}$ ,  $\Delta W_s = 8 \text{ kg/s}$ ,  $\Delta T_p = 5^\circ \text{ K}$ ,

$\Delta T_f = 33^\circ \text{ K}$  계단 변화에 따른 수위변화

Fig. 2 Level responses of S/G model for step increases such that  $\Delta W_f = 8 \text{ kg/s}$ ,  $\Delta W_s = 8 \text{ kg/s}$

$\Delta T_p = 5^\circ \text{ K}$ ,  $\Delta T_f = 33^\circ \text{ K}$

### 3. 기존 수위 제어기

원자력 발전소의 증기발생기는 급수유량, 증기유량 및 1차측 냉매온도 변화에 따른 역 동특성을 지니며 특히, 저출력으로 운전할 때에 역 동특성이 커져 원하지 않는 제어동작으로 인하여 발전소 정지사고로 이어지는 경우가 많다. 이로 인해 저출력 영역에서는 대부분 수동으로 수위를 조절하거나 일반 PI제어기로 운전하고 있는 실정이다. 본 장에서는 일반 PI제어기와 저출력 영역에서 PI제어기의 성능을 개선하기 위하여 급수유량과 수위를 동시에 제어하는 개선된 구조의 PID제어기를 소개하고, 개선된 구조의 PID제어기에서 수위제어부를 퍼지논리로 구성한 퍼지제어기를 제시하고자 한다.

#### 3.1 기존 수위오차 제어(PI제어)

증기발생기의 수위제어기로 현재 현장에서 널리 운영하고 있는 기존 수위오차 제어(PI제어)의 구조는 그림 3과 같다. 이 제어기는 고출력 구간에서는 수위오차 제어와 증기유량과 급수유량의 오차 제어를 함께 하지만 저출력 영역에서는 단지 수위오차 제어만 수행한다.

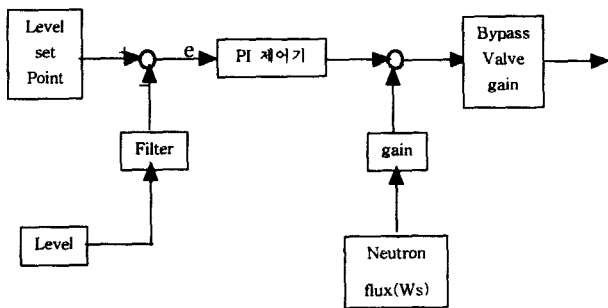


그림 3 저출력에서 기존 수위오차(PI제어) 제어 블록도  
Fig. 3 The block diagram of a conventional control of water level in low power

#### 3.2 개선된 구조의 PID제어

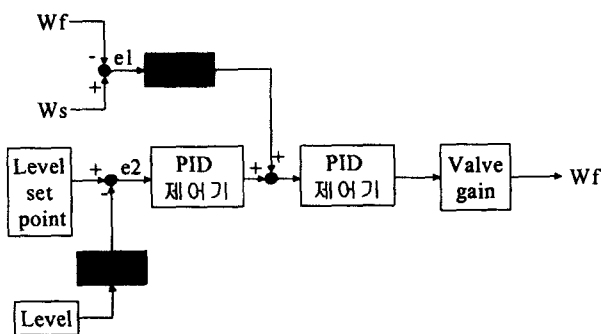


그림 4 저출력에서 개선된 구조의 PID제어의 블록도  
Fig. 4 The block diagram of advanced structure of PID control in low power

기존 수위오차 제어는 저출력 영역에서 단지 수위오차만을 제어함으로써 안정적인 수위 조절에 어려움이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 그림 4와 같이 수위제어 오차와 증기유량과 급수유량 오차로 페루우프로 형성하는 개선된 구조의 PID제어방법이 참고문헌[7]에서 제안되어 기존 수위오차 제어 방법보다는 좋은 성능을 나타내었다.

그림 4에서 개환되는 측정치(증기발생기의 수위, 증기유량, 급수유량)는 잡음제거를 목적으로 1차 저역통과 필터를 사용하였으며 필터 시정수는 5sec이다.

#### 3.3 퍼지 제어

개선된 구조의 PID제어방법에서 수위제어 개환부를 PID제어기 대신에 퍼지 이론에 의하여 퍼지 제어기를 설계하고 제어성능을 향상하였다. 퍼지 입력은 수위오차와 수위오차의 변화량으로 하고 범위는 -1~1로 표준화하였으며, 규칙은 7×7의 49개를 사용하였다. 또한 추론으로는 mandani 추론법을 사용하고 비퍼지화는 무게중심법을 적용하였다. 퍼지 제어기는 일반적으로 다음과 같은 퍼지제어 규칙으로 구성한다.

*R* If  $X_1$  is  $A_i$  and  $X_2$  is  $A_j$  then  $U$  is  $B_k$

여기에서,

- $R$  : 퍼지규칙
- $X_1, X_2$  : 제어입력
- $A, B$  : 멤버쉽수
- $U$  : 출력 이다.

퍼지 제어기의 핵심은 규칙에 있으며 증기발생기 수위제어를 위한 숙련된 현장운전자의 경험지식을 기반으로 제어규칙 베이스를 형성하고 적절한 추론과 비퍼지화방법을 도입하여 제어기를 설계한다. 본 논문에서 퍼지제어 규칙은 여러 시행착오를 거쳐 최상의 제어성능을 얻을 수 있도록 설계하였다. 실제 퍼지제어기를 현장에 적용하기 위해서는 많은 시행착오 과정이 필요하고 기존 PID제어기와 연관성이 적어 제어설비를 교체하거나 큰 변경이 요구되기 때문에 현재는 어려움이 있다. 그림 5는 저출력에서 퍼지제어의 구조를 보여준다.

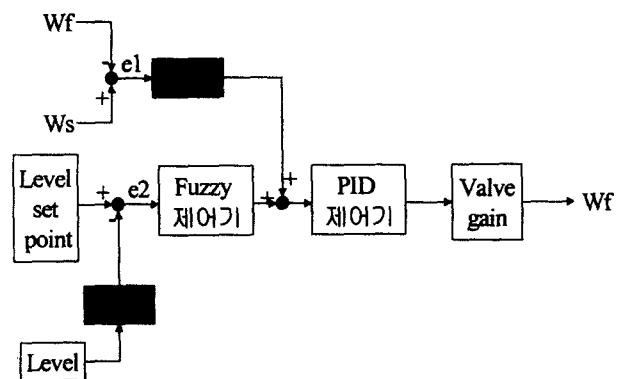


그림 5 저출력에서 퍼지제어의 블록도  
Fig. 5 The block diagram of fuzzy control in low power

4. 자기동조 퍼지 PID 제어기

증기발생기 수위제어용 퍼지제어기를 구현하는데 어려움이 있을 뿐 만아니라 현장에 이미 설치 운영하고 있는 PID제어기 설비를 이용할 수 없어 실제 현장적용이 더디고 있는 실정이다. 또한, 퍼지제어기는 고정된 공정을 대상으로 규칙을 구성하고 입출력 영역을 결정하므로 용량이 다른 시설이나 다른 환경에서의 적용성이 떨어진다. 본 논문에서는 퍼지논리를 이용하여 현장운전자의 숙련된 경험지식을 PID제어기에 내장하여 성능향상을 도모하는 한편 기존 PID제어기 설비를 이용할 수 있도록 퍼지 자기동조기를 개발하고 증기발생기 수위제어에 적용하였다. 제어대상이 단위 입출력 시스템이라면 이에 대한 표준 PID제어기는 (6)과 같이 표현한다

$$u(t) = K[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (6)$$

여기에서  $u(t)$ 는 제어신호,  $e(t)$ 는 제어오차로 기준입력과 출력의 편차이고  $K, T_i, T_d$ 는 PID이득으로서 각각 비례이득, 적분시간, 미분시간이라 칭한다. PID제어기는 구조가 단순하고 현장운전자에게 익숙하며 견실하다는 장점 때문에 현장에 널리 이용되나 좋은 제어성능을 유지하기 위해서는 적절한 동조가 필요하다. 동조란 이러한 제어이득을 공정특성에 맞게 적절히 조절하는 것을 의미한다. 일반적으로 널리 이용되는 동조법은 Ziegler-Nichols법이 있다. 이 방법은 플랜트에 인위적으로 여자신호를 인가하여 출력이 일정한 진폭과 주기를 갖도록 하고 이로부터 임계값( $k_c, t_c$ )를 구하여 (7)로부터 PID이득을 구한다[12].

$$K = 0.6k_c, \quad T_i = 0.5t_c, \quad T_d = 0.25T_i \quad (7)$$

실제 임계값을 얻기 위하여 플랜트 출력이 일정한 주기와 진폭을 갖도록 자동화하기는 매우 어려우며 이를 개선한 방법이 릴레이 제한에 의한 동조이다. 릴레이제한 동조는 출력이 인위적으로 발진하도록 릴레이신호를 인가하여 임계값을 쉽게 구하도록 하였다. 이들 방법은 초기 동조 방법으로는 적합하나 운전중 왜란이나 환경변화에 의한 플랜트의 동특성이 변할 때는 재동조를 하여야 하는 어려움이 있다.

본 논문에서는 이와같은 개념을 바탕으로 퍼지이론을 도입하여 공정 동특성에 따라 실시간으로 PID이득을 조절하는 자기동조 퍼지 PID제어기를 개발하였다. 이를 위해 먼저 (7)를 하나의 계수  $\alpha$ 로 등식화하여 (8)와 같이 표현한다. 초기에  $\alpha$  값을 0.5로 하고 제어오차와 오차의 변화량에 따라 퍼지 자기동조 메카니즘에 의하여  $\alpha$ 를 온라인으로 조정함으로써 PID이득을 자동동조한다[8]-[9].

$$K = 1.2\alpha k_c, \quad T_i = 0.75 t_c / (1 + \alpha), \quad T_d = 0.25 T_i \quad (8)$$

자기동조 퍼지 PID제어기의 구조는 그림 6과 같으며 감독자는 제어동작 구간을 초기동조와 온라인동조 구간으로 분류

하고 초기동조 구간에서는 릴레이제한 실험을 실행하여 임계값을 구하고  $\alpha$  값을 0.5로 한다. 온라인 동조구간에서 감독자는 플랜트 출력과 제어입력을 모니터링하여 시스템 불안정성을 감지한다. 만약, 불안정이 예측되면 퍼지 동조기능을 중단하고 일반 PID제어기만 작동하도록 한다. 퍼지 자기동조 메카니즘은 제어오차와 오차의 변화량에 따라  $\alpha$ 를 온라인으로 조정함으로써 PID이득을 자동동조한다.

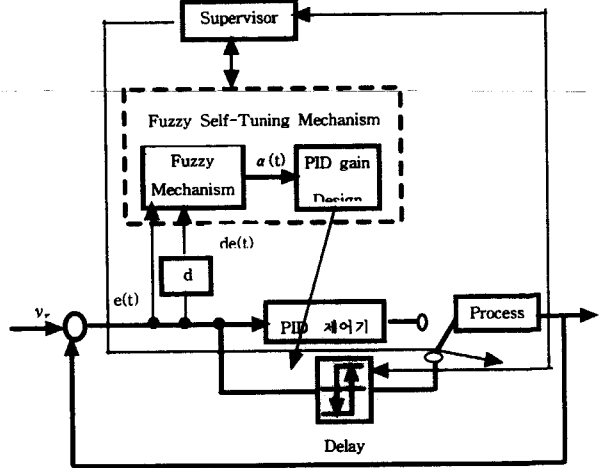


그림 6 자기동조 퍼지 PID제어기의 블록도

Fig. 6 Block diagram of self-tuning fuzzy PID controller

초기동조 구간에서는 릴레이 제한을 형성하고 출력신호의 주기로 부터 임계주기( $t_c$ )와 첨두치값( $a$ )을 측정하여 임계이득( $k_c = 4d/\pi a$ )을 구한다.

퍼지 자기동조 메카니즘은 그림 7과 같이  $e$ 와  $\Delta e$ 이 주어졌을 때,  $\alpha(t)$  값을 산출하는 퍼지논리 메카니즘과 동조식을 이용하여 PID이득을 설계하는 PID이득 설계구간으로 구성한다. 또한, 퍼지논리 메카니즘은 퍼지논리부와  $\alpha(t)$ 의 연산부로 나누어 지고, 퍼지논리부는  $e(t)$ 와  $de(t)$ 를 퍼지변수, E와 DE로 퍼지화하는 퍼지화부, 규칙과 추론장치에 의하여 H를 산출한 Look-up테이블, H를 실제변수  $h(t)$ 로 산출화하는 비퍼지화부로 구성하였다. 여기에서 쓰이는 퍼지 입력은 수위오차와 수위오차의 변화량으로 하고 범위는 -1~1로 하였으며, 규칙은 제어기 설계에일반적으로 많이 쓰이는 7×7의 49개를 사용하였다. 또한 추론으로는 mandani추론법을 사용하고 비퍼지화는 무게중심법을 적용하였다. 빠른 연산을 위해 추론과정을 통해 얻은 결과를 Look-up테이블 형태로 저장하고 E와 DE값에 따라 즉시 H를 얻을 수 있도록 하였다. 또한,  $h(t)$ 는 (9)와 같이 구한다.

$$h(t) = f^{-1}[K_3 H(k)] \quad (9)$$

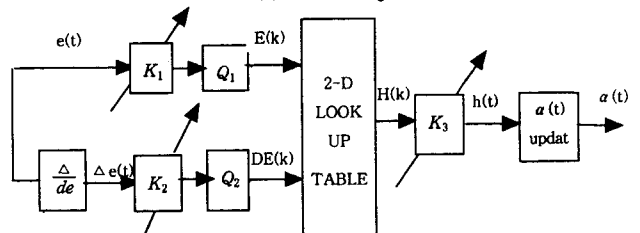


그림 7 퍼지메카니즘의 블록도

Fig. 7 Block diagram of a fuzzy mechanism

연산부는 퍼지논리부에서 구한  $h(t)$ 을 이용하여 (11)에 의하여  $\alpha(t)$ 를 증감한다.  $h(t)$ 는 학습계수와 같은 의미로 출력 스텔링값  $K_3$ 에 의하여 크기가 결정되며 보통 0.05정도의 값이 되도록 한다.

$$If(E \times \Delta E < 0), Then h(t) = |h(t)|, else h(t) = -|h(t)| \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \alpha(t+1) &= \alpha(t) + h(t)(1 - \alpha(t)), \text{ for } \alpha(t) > 0.5 \\ \alpha(t+1) &= \alpha(t) + h(t)\alpha(t), \text{ for } \alpha(t) \leq 0.5 \end{aligned} \quad (11)$$

위식에서 초기값  $\alpha(0)$ 은 0.5로 정하였다. 또한  $\alpha(t)$ 값을 0~1로 한정함으로써 PID제어 계수가 완만하고 한정된 적응성을 갖도록 보장하였다. 이 식에 의한  $\alpha(t)$ 의 증가는 K를 증가시키고  $T_i, T_d$ 를 감소시켜 오차가 빠르게 수렴하도록 하는 반면  $\alpha(t)$ 의 감소는 K를 감소시키고  $T_i, T_d$ 를 증가시켜 발산을 더디게 한다.

이와 같이 설계된 자기동조 퍼지 PID제어기를 그림 8과 같이 개선된 구조의 PID제어 방법에서 수위오차 제어부에 적용하여 제시한 제어기의 성능을 평가한다.

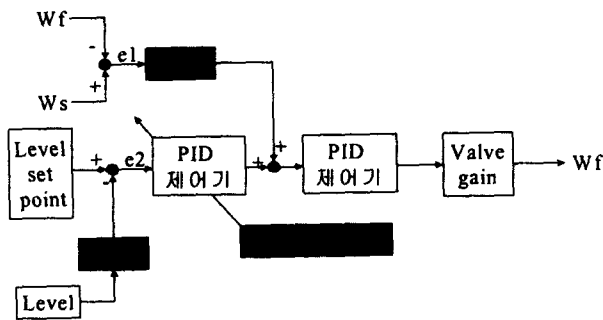


그림 8 저출력에서 자기동조 퍼지 PID제어의 블록도  
Fig. 8 The block diagram of self-tuning fuzzy PID control in low power

### 5. 시뮬레이션 및 고찰

본 장에서는 기존의 수위오차제어(PI제어)와 개선된 구조의 PID제어 그리고 개선된 구조의 PID제어의 루우프에서 수위제어 부분을 퍼지논리로 대체한 퍼지제어 및 본 논문에서 제안한 자기동조 퍼지 PID제어를 앞서 선정된 증기발생기 모델에 적용하고 여러 실험 조건하에서의 성능을 비교 분석하였다. 시뮬레이션은 증기유량이 변할 때에 급수유량이 증기유량을 잘 추종하는지와 수위발생기의 수위가 설정값 50%을 유지하는 지에 대하여 각각의 제어기별로 실험하였다. 또한 1차측 냉매온도와 급수온도가 변화하였을 때의 수위에 대하여서도 같은 실험을 수행하였다. 이 모든 실험들은 증기발생기 수위제어에 어려움이 있는 20% 이하의 저출력 영역에서만 수행하였다. 그림 9은 시뮬레이션을 위한 출력 시나리오이다. 0~8000초는 출력 5%구간, 8000~9000초는 출력 5%에서 출력 20%까지의 램프운전구간, 9000~15000초는 출력 20%구간으로 하였다. 또한 출력 시나리오에 따른 증기량은 그림 10

과 같으며 시나리오 함수를  $W_s(t)$ 라 하였다. 이는 5%의 출력구간에서는 16.66(Kg/sec)을 유지하고 5%에서 20%까지의 램프 운전구간에서는 출력이 비례하여 선형 변화하며 20%출력 구간에서는 76.65(Kg/sec)을 유지한다. 1차측 냉매온도, 급수온도의 정상상태 시나리오도 증기량 시나리오와 같이 출력 시나리오에 따라서 변화하며 이를 그림 11과 그림 12에서 표현하였으며 각각의 시나리오 함수를  $T_p(t), T_f(t)$ 라 정의하였다. 이 출력에 따른 입력변수의 정상상태 값을 표 1에 제시하였다.

표 1 출력에 따른 입력변수의 정상상태 값  
Table 1 Value of input parameters for power

출력 (%)	주증기량 $W_s$ (kg/sec)	1차측 냉매온도 $T_p$ (K)	급수 온도 $T_f$ (K)
5	16.66	566.3	318.2
10	30.30	568.1	318.2
15	52.51	569.8	348.6
20	76.65	571.5	399.3

위 실험에서 각 제어기의 구조에서 밸브이득 역시 출력에 따라서 변화한다. 이를 역시 표 2에 제시하였으며 5%~20%까지의 밸브이득의 변화를 출력에 맞게 선형화 시켰다.

표 2 출력에 따른 밸브이득 특성  
Table 2 Characteristic of valve gain for power

출력 (%)	밸브 이득
5	33.190
10	66.392
15	105.020
20	153.292

그림 13는 앞서 제시한 시나리오중 1차측 냉매온도와 급수 온도의 시나리오는 그대로 유지하면서 그림 10의 시나리오의 증기량만 5%구간과 20%구간에서 정상 상태 증기량의 10% 계단 변화를 주어 급수유량이 증기유량을 잘 추종하는지 여부를 각 제어기별로 비교한 그림이다. 그림에서 보듯이 기존의 PI 제어는 그 성능이 아주 떨어졌으며 본 논문에서 제안한 자기동조 퍼지 PID 제어가 다른 제어방식에 비하여 그 성능이 우수함을 알 수 있다. 그림 14은 그림 13로 주어진 환경 하에서 증기유량 변화에 따른 수위변화를 보여주는 그림이다. 기존의 제어방법들에 의한 출력이 진동현상이 많거나 진폭이 큰 반면 본 논문에서 제안한 자기동조 퍼지 PID제어에 의한 수위제어는 수위가 안정함을 보여준다

그림 15은 증기유량과 급수온도의 시뮬레이션 시나리오를 유지하면서 그림 11의 1차측 냉매온도를 5%와 20% 출력구간에서 5°C 계단 변화시킨 것이며 그에 따른 수위변화 결과를 그림 16에서 나타내었다. 그림에서 보듯이 계단 변화하는

부분에서 수위가 온도의 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 수위제어에 온도변화도 큰 영향이 있음을 알 수 있으며 어빙(Irving)모델에서 무시되었던 온도도 무시할 수 없음을 알 수 있다.

그림 17는 증기유량과 1차측 냉매온도의 시뮬레이션 시나리오는 그림 10와 그림 11과 같이 유지하면서 급수온도 시나리오만 5%와 20% 출력구간에서 5 °C 계단 변화시킨 것이다. 그 결과를 그림 18에서 나타내었으며 이를 볼 때 1차측 냉매온도의 결과와 유사함을 알 수 있었다. 시뮬레이션 결과를 통하여 본 논문에서 제시한 자기동조 퍼지 PID제어가 다른 제어방법에 비하여 전반적으로 우수한 성능을 보여주고 있다. 다만, 퍼지 제어에 비하여 약간의 성능이 떨어지나 퍼

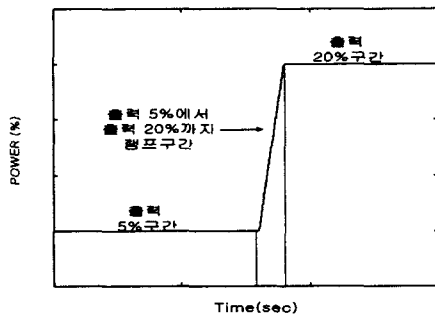


그림 9 출력 시나리오  
Fig. 9 Scenario of Power

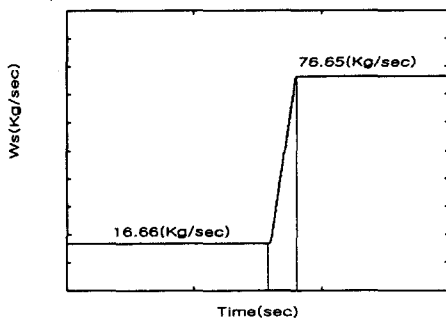


그림 10 증기량 시나리오  
Fig. 10 Scenario of steam flow rate

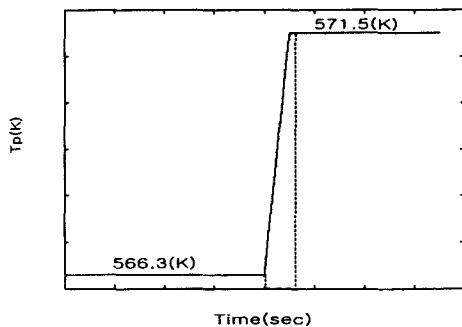


그림 11 1차측 냉매온도  
Fig. 11 Scenario of primary coolant temperature

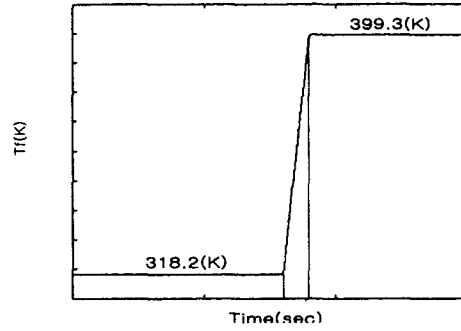


그림 12 급수온도 시나리오  
Fig. 12 Scenario feedwater temperature

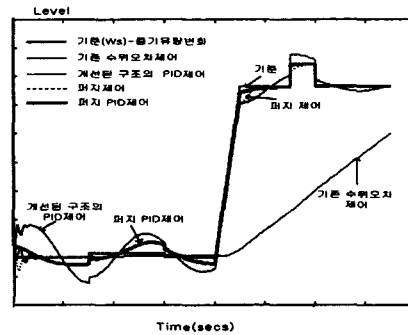


그림 13 증기유량 변화에 따른 급수유량 변화  
Fig. 13 Response of feedwater flow rate for change of steam flow rate

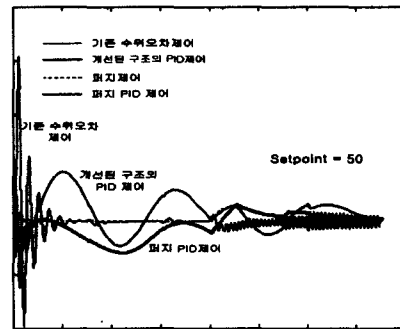


그림 14 증기유량 변화에 따른 수위 변화  
Fig. 14 Level response for feedwater flow rate

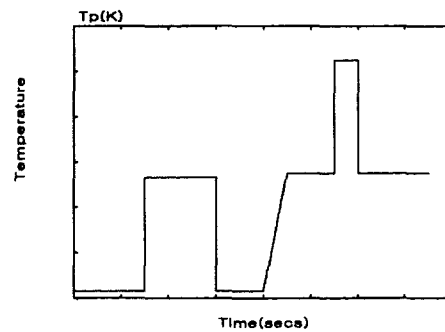


그림 15 5%와 20% 출력구간에서 1차측 냉매온도 계단변화  
Fig. 15 Step variation of primary coolant temperature for power load to 5% and 20%

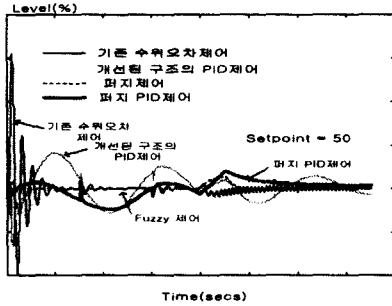


그림 16 1차측 냉매온도와 변화에 따른 수위 변화  
 Fig. 16 Level response for step variation of primary coolant temperature

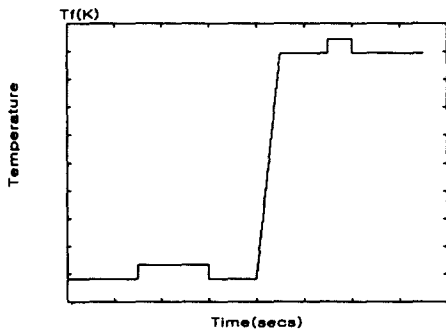


그림 17 5%와 20% 출력구간에서 급수온도 계단변화  
 Fig. 17 Step variation of feedback temperature for power load to 5% and 20%

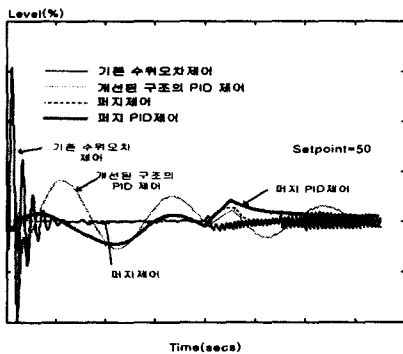


그림 18 급수온도 변화에 따른 수위변화  
 Fig. 18 Level responses for step variation of feedback temperature

지제어기는 적응능력이 없고 실제 현장적용을 하기 위해서는 기존 설비를 변형하거나 대체하여야 하는 어려움을 감안할 때 자기동조 퍼지 PID제어기가 여러 장점을 갖는다.

### 6. 결론

본 논문에서는 현재 수위제어기로 널리 이용되고 있는 PID 제어기에 퍼지이론을 이용하여 외란제거 능력과 동특성 변화에 따른 자기동조 기능을 부여하여 성능을 개선하였다.

이와 같은 방법은 안전장치, 수동 조작, 응급 복구 기능등을 갖춘 기존의 PID 제어시스템 설비를 교체하지 않고 단지 제안한 알고리즘을 첨가함으로써 기존PID 제어의 단점을 개선하는 장점이 있다.

저출력에서 기존의 PID 제어방식이 외란제거와 설정치 추종능력을 갖도록 퍼지이론을 이용하여 플랜트 동특성 변화에 따라 실시간 자기동조 기능을 제공하였다. 이를 구현하기 위해 PID 제어계수를 Ziegler-Nichols동조식에 따라 하나의 계수  $\alpha$ 에 의하여 등식화하고 제어오차와 오차변화량에 따라 퍼지추론에 의하여 이를 증감하도록 하였다. 이와 같은 개념은 현장에서 이미 운용되고 있는 증기발생기 수위제어용 PID 제어를 교체하지 않고 이에 자기동조 기능을 제공함으로써 성능향상을 도모할 뿐만 아니라 현장 적용을 용이하게 한다. 성능평가를 위해 저출력 영역에서 수위만을 제어하는 기존 제어방식에서 급수유량과 수위를 동시에 제어하는 제어루프를 형성하고 수위제어에 해당하는 제어부분을 외란동 환경변화에 적응성을 갖도록 퍼지 규칙에 의하여 자기동조하는 퍼지 PID제어기를 구현하고 시뮬레이션에 의한 여러 제어기들과 비교 분석하여 제시한 방법의 우수함을 보였다.

앞으로 미비한 점을 보완하여 현장에 직접 이용토록 제어 알고리즘을 구현하여 실제 증기발생기의 수위제어 설비에 탑재하는 연구를 하고자 한다. 또한, 제안한 퍼지 동조기능을 단일칩에 구현하고 기존 PID 제어시스템의 설비 변경을 최소화하면서 이러한 기능을 제공하는 H/W적인 방법에 대한 연구가 필요하다.

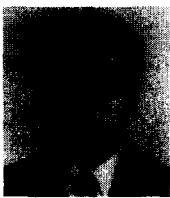
**감사의 글**  
 1997년도 한국전력공사 지원 전력기술 기초연구과제에 의한 연구결과입니다.

### 참 고 문 헌

- [1] E.Irving, et al. "Toward efficient full automatic operation of the PWR steam generator with level adaptive control,"Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Station, 1980.
- [2] 이운준, "원자력발전소 증기발생기의 저출력 수위 조절에 대한 연구", 서울대학교, 공과대학 원자핵공학과 박사학위논문, 1991.2
- [3] 박상현, "증기발생기 수위제어기 설계 및 성능평가에 관한 연구", 충남대학교, 전자공학과 석사논문, 1996
- [4] Z. Guo et al. "Nuclear power plant performance study by using neural network," IEEE Trans. Nuclear Science, vol. 39, no. 4, pp. 915-918, 1992
- [5] Takshi et al. "Application of fuzzy logic control system for reactor feed-water control," Fuzzy Sets and Systems, vol. 74, pp. 61-72, 1995.
- [6] 박기용, 증기발생기 수위제어를 위한 퍼지학습 제어시스템 개발에 관한 연구, 한국과학기술원, 원자핵공학과 박사논문, 1996

- [7] 이상정, 계층적 제어 구조를 이용한 원전 제어 계통 적용 기술 개발에 관한 연구, 충남 대학교 연구 보고서, 1994
- [8] 이창구, 김성중, "Fuzzy 논리를 이용한 온라인 자기동조 PID제어기 개발", 대한전기학회 논문지, 제 43권, pp. 1938-1945, 1994
- [9] 이창구의 2인, "경험적 규칙을 이용한 자동동조 PID제어기", 전기학회 논문지, vol.39,no.5, pp.485-493, 1990
- [10] A. Hoeld. "A theoretical model for the calculation of large transients in nuclear natural circulation U-tube steam generators," Nuclear Engineering and Design, vol. 47, pp. 1-23, 1978
- [11] Y. J. Lee and U. C. Lee, "Digitalization of the Nuclear Steam Generator Level Control System", Journal of the Korean Nuclear Society, vol.25, no. 1, pp. 125-135, 1993.
- [12] K. J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins," Automatic, Vol. 20, No. 5, pp. 645-651, 1984.

저 자 소 개



**한진욱 (韓進旭)**

1973년 4월 3일생. 1997년 전북대 공대 제어측공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과졸업(석사). 1997년~현재 전북대학교 전자정보공학부 조교. 현재 동 대학원 전자공학과 박사과정

Tel : (0652) 272-1973

E-mail : modesty@icrn.chonbuk.ac.kr



**이창구 (李昌求)**

1958년 12월 25일생. 1981년 전북대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1983년~1992년 한국전자통신연구소 선임연구원. 1996년 Alberta대학 방문교수. 현재 전북대 공대 전자정보공학부 교수

Tel : (0652) 270-2476

E-mail : changgoo@moak.chonbuk.ac.kr

**한후석 (韓后錫)**

1958년 10월 24일생. 1987년 전북대 공대 전기과 졸업. 1997년 전북대학교 박사과정 수료. 현재 기초전력연구소 선임연구원