

신경망 2-자유도 PID제어기를 이용한 원자력 발전소용 증기 발생기 수위제어

The Level Control of Steam Generator in Nuclear Power Plant by Neural Network 2-DOF PID Controller

김 동 화, 이 원 규
(Dong Hwa Kim and Won Kyu Lee)

Abstract : When we control the level of the steam generator in the nuclear power plants, a swell and shrink arises from many disturbances such as feed water rate, feed water temperature, main steam flow rate, and coolant temperature. If we use the conventional type of PI controller in this system, we will not have stability during controlling at lower power, the removal function of disturbances, and a load follow-up control effectively. In this paper, we study the application of a 2-Degree of Freedom(2-DOF) PID controller to the level control of the steam generator of nuclear power plants through the simulation and the experimental steam generator. We use the parameters α, β, γ of the 2-DOF PID controller for the removal of disturbances and the parameters K_p, T_i, T_d of the conventional type of PID controller for controlling setpoint. The back-propagation learning algorithm of neural network is used for tuning the 2-DOF PID controller. We can find satisfactory results of the removal of the disturbances and the tracking function in the change of setpoint through the simulation and experimental steam generator.

Keywords : intelligent control, PID control, nuclear power plant

I. 서론

원자력 발전소의 증기발생기는 원자로의 열출력을 받아 증기를 발생시켜 터빈에 증기를 공급하기 위한 원자력 발전의 핵심 설비로 터빈 부하 변화나 기타의 외란 현상에 관계없이 항상 그 수위를 일정하게 유지함으로써 증기를 안정하게 공급 할 수 있어야 한다. 원자력 발전소용 증기발생기의 수위제어는 원자력 발전소의 안전운전상 매우 중요한 요소이나 수위변화에 관계되는 주 급수유량 및 온도, 주 증기 유량, 냉매온도 등에 따라 증기 발생기 내에서 응축(shrink) 및 팽창(swell)현상이 발생하여 쉽게 제어 할수 없는 문제점을 갖고 있어 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다[1]-[4]. 특히 저부하 운전시 원자로 출력에 안전하게 추종하면서 적정 수위를 유지하는 것은 안전운전상 매우 중요하여 숙련된 운전원의 운전기술이 필요하다. 이때 운전원은 원자로의 적정 출력변화 상태와 기타 증기 발생기의 운전조건인 주 급수 및 주 증기 유량 변화, 증기 발생기의 수위, 1차 냉매온도 및 급수온도 등의 외란조건등을 안정하게 유지하면서 제어계통을 운전 할 수 있어야 한다. 즉, 운전원은 원자로 출력에 따른 이들 변수들의 변화 등을 고려하면서 제어를 수행하여야 한다. 특히 최근의 원자력 발전소는 전력 소비량이 증가함에 따라 에너지 공급원으로서 중요한

역할을 담당하게 되어 플랜트 제어의 중요성은 날로 더해가고 있다. 원자력 발전소의 운전계통은 원자로 제어계통, BOP제어계통, 가압기 제어계통, 증기 발생기 제어계통 등과 같이 부시스템(subsystem)으로 구성되어 있다. 따라서 각 부 시스템의 제어 성능은 곧 전 플랜트의 성능과 직결된다.

본 논문에서 연구한 증기 발생기의 수위제어 계통은 부하변화시 증기 유량에 따라 발생하는 응축, 팽창 현상에 의해 수위변화가 불규칙하여 제어에 상당한 어려움을 겪고 있는 부분이다[3]-[5]. 이러한 증기 발생기의 수위 제어계통에 적용되고 있는 제어기는 PI제어기로 그 제어 알고리즘이 단순화되어 있고 튜닝 기법도 매우 고전적인 방법을 이용한다. 따라서 외란제거 및 설정치 변화에 대한 추종 성능에 한계가 있다. 특히 불규칙한 외란이 발생하거나 부하추종 성능을 향상시키기 위해서 설정치를 가변하는 경우는 원활한 제어가 어렵고 그만큼 운전원의 부담이 커지게 된다. 이러한 계통에 현대제어이론을 적용하는 경우 제어결과는 이론상 매우 우수한 것으로 볼 수 있으나 실제의 시스템에 대한 적용성 문제는 매우 부정적이다. 원자력 발전소용 수위제어의 경우 대부분 PI제어기를 적용하여 튜닝하는 문제에 국한하고 있으나, PI제어기의 경우는 설정치 변경과 외란 제어기능을 동시에 가질 수는 없다. 이러한 문제점에 입각하여 본 연구에서는 제어 알고리즘은 기존의 PID제어기와 같이 단순하고 외란제거와 설정치 추종성능을 동시에 만족하는 것이 매우 우수한 것으로 알려진 2-자유도 PID제어기를 증기발생기의 수위 제어계통에 적용하는 문제를 연구하였다. 2-자유도 PID제어기의 경우 설정치 변화에 대

접수일자 : 1997. 10. 7., 수정완료 : 1998. 5. 8.

김동화 : 대전산업대학교 제어계측공학과

이원규 : 대전산업대학교 전기공학과

※ 본 논문은 1996년도 기초전력 공학 공동 연구소 지원에 의해 이루어진 연구 결과입니다. 지원하여 주신 관계기관에 깊은 감사를 드립니다. (과제번호 96-015)

해서는 기존의 P, I, D파라미터를 이용해 적절히 튜닝하고 외란에 대해서는 2-자유도 파라미터 α, β, γ 를 이용함으로써 설정치 변화와 외란제거 기능을 동시에 만족할 수 있다.

특히 본 연구에서는 2-자유도 PID 제어기의 튜닝을 신경망을 이용함으로써 적은 외란이 발생하거나 설정치 변경이 있는 경우 그 오차를 학습함으로써 상호보완 기능을 향상 시키도록 하였다. 본 연구에서의 연구는 시뮬레이션을 통해 고찰하고 이 결과를 축소 제작한 모형 증기발생기상에서 직접 응축 및 팽창 효과를 시험하면서 설계한 제어기를 적용하여 응축 및 팽창 제어기 성능을 시험하였다. 이들 결과는 기존의 PI제어기와 비교함으로써 성능의 우수성을 비교 검토하였다.

II. 증기 발생기 수위제어 방법 및 문제점

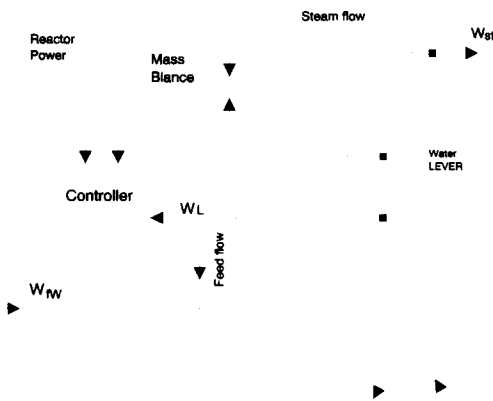


그림 1. 증기 발생기의 수위제어계통.
Fig. 1. Level control system of steam generator.

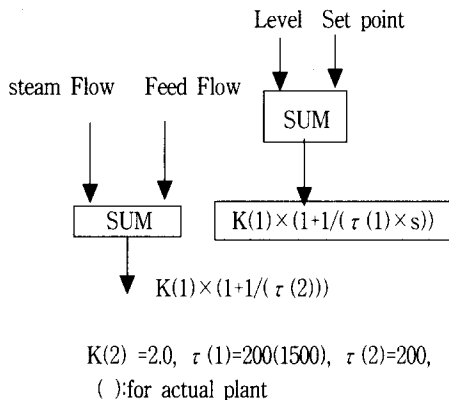


그림 2. 주 급수밸브 PI제어기.
Fig. 2. PI Controllers for main feed water valve.

증기 발생기의 수위제어는 그림 1과 같이 증기발생기의 수위변화 오차신호, 증기 유속신호, 급수 유속신호를 받아 주 급수펌프의 속도와 주 급수밸브의 개도를 조절함으로써 이루어진다[1]-[5]. 이와같은 증기발생기 수위제어에 사용되고 있는 제어기는 주로 PI제어기로 그 운전 특성상 새로운 제어 알고리즘의 적용이 어려워 다른 프로세스에서 이용되고 있는 다양한 제어이론이나 응용방

법에 대한 연구가 극히 제한적이다. 뿐만 아니라 PI제어기의 튜닝도 기존의 고전적인 방법을 그대로 이용하고 있어 일반 프로세스에서는 이미 검증되어 있고 제어기 전문 메이커에서 판매하고 있는 프로세스용 제어기에 장착된 다양한 첨단 제어기의 튜닝 방법이 사용되고 있지 않다.

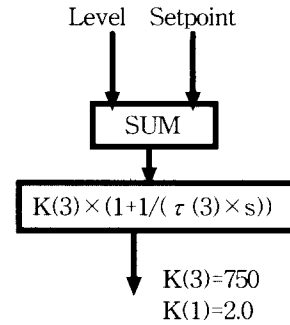


그림 3. 급수 바이패스 밸브 PI제어기.
Fig. 3. PI controller for feed water bypass valve.

그림 2와 3은 기존의 제어계통에 사용되고 있는 제어 알고리즘으로서 증기 유량과 보충수 유량, 수위와 설정치 로직이 독립적으로 이용되고 또 바이패스 밸브 로직도 독립적으로 운전되어 전체적인 효율과 안전성을 기대하기 어렵게 되어 있다. 특히 외란과 설정치 변화시의 제어기능을 기대하기 어렵다.

III. 신경망 2-자유도 PID제어기 설계를 위한 증기 발생기

증기발생기의 모델은 제조회사에 따라 달라 여러 가지가 제시되고 있는데 본 연구에서 사용한 모델은 그림 4와 같이 증기발생기 수위변화에 영향을 미칠수 있는 변수들을 주 급수유량, 주 증기유량, 1차측 냉매온도, 주 급수온도 4개의 변수로 정의하고 이들 변수의 영향에 의해 증기 발생기의 출력(수위)이 변하는 것으로 하였다[5][6].

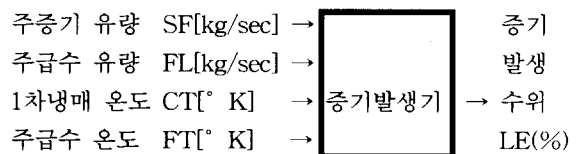


그림 4. 증기 발생기의 수위변화에 미치는 변수.
Fig. 4. The parameters to affect the level variation of steam generator.

이들 4개의 변수들은 서로 관련이 있어 어느 하나의 변수를 가변시키는 경우 다른 변수들을 독립적 또는 일정한 상수로 취급되고 가변된 변수만에 의해 제어할 수 있는 것은 아니나 각각의 변수 변화에 대한 출력의 특성을 고찰하기 위해 간섭이 없는 것으로 가정하여 전달함수를 구하고 그 결과에 의해 각각의 파라미터가 수위에 미치는 영향을 시뮬레이션 하였다. 따라서 위 시스템에서 각각의 입력변수가 수위변화에 미치는 영향을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$LE(s) = [G_1(s)FL(s), G_2(s)SF(s), G_3(s)CT(s), G_4(s)FT(s)] \quad (1)$$

LE(s) : 증기발생기 수위
 FL(s) : 주 급수 유량
 SF(s) : 주 증기 유량
 CT(s) : 1차 냉매 온도
 FT(s) : 주 급수 온도

$$k_1 = 1.1 \times 10^{-4}$$

$$k_2 = -0.012097 e^{-0.0906P} - 0.001$$

$$\zeta_1 = 0.1985 e^{0.03P}$$

$$\omega_{n1} = \frac{\pi}{t_{p1} \sqrt{1 - \zeta_1^2}}$$

$$k_3 = 0.0196 e^{-0.0735P} + 0.007$$

$$k_4 = \begin{cases} 1.17 \times 10^{-5} P^3 - 6 \times 10^{-4} + 0.01P + 0.0223, & P \leq 25 \\ 0.0801 - 0.0004(P - 25), & P > 25 \end{cases}$$

$$k_5 = -2 \times 10^{-7} P + 1.1 \times 10^{-5} P^2 + 2.7 \times 10^{-4} P + 0.0041$$

$$G_1(s) = \frac{k_1}{s} + k_2 \omega_m^2,$$

$$G_2(s) = \frac{-k_1}{s} + \frac{0.05k_3}{s + 0.05}, \quad (2)$$

$$G_3(s) = \left[\frac{k_4(a_3 - b_3)s}{(s + a_3)(s + b_3)} + \frac{c_3 k_5}{s + c_3} \right] e^{-d_3 s},$$

$$G_4(s) = \frac{k_6 \omega_m^2}{s^2 + 2\zeta_4 \omega_m s + \omega_m^2}$$

$$b_3 = a_3 / 10$$

$$c_3 = \begin{cases} 0.399P - 1.99, & 0 < P \leq 10 \\ 2, & 10 < P \leq 30 \end{cases}$$

$$k_6 = 4.43 \times 10^{-4} e^{0.0348P}$$

$$t_{p4} = 195 e^{-0.16P} + 22$$

$$\zeta_4 = 0.535 e^{-0.16P}, \quad 0 < P \leq 15$$

$$0.172, \quad 15 < P \leq 30$$

$$\omega_{m4} = \frac{\pi}{t_{p4} \sqrt{1 - \zeta_4^2}}$$

윗 식에서 $G_1(s)$ 는 주 급수변화에 따라 증기발생기 내의 질량변화에 미치는 영향에 대한 전달함수이고, $G_2(s)$ 는 증기 유량에 따라 증기 발생기 내의 에너지 변화가 일어나는 것에 대한 전달함수이다. 또 $G_3(s)$ 는 증기발생기의 모멘텀 효과에 따른 전달함수, $G_4(s)$ 는 주 급수온도 T_j 의 변화에 대한 수위 변화를 나타내는 전달함수이다.

IV. 수위제어용 신경망 2-자유도 PID제어기

1. 제어 알고리즘

본 연구에서 사용한 2-자유도 PID 제어기는 그림 5와 같은 구조를 갖는다[7][8].

그림 5에서 $\frac{1 + a\beta T_1 s}{1 + \beta T_1 s}$ 는 목표치 필터, $K_p(1 + \frac{1}{T_i s})$ 는 PI 제어기이고 $\frac{K_p T_d s}{1 + \eta T_d s}$ 는 미분항으로 필터를 첨가한 것이다.

이 시스템에서 설정치 SV와 조작량 MV간의 전달함수, 설정치 SV와 출력 PV사이의 전달함수는 각각 (3),(4)로 주어진다. (3)은 조작량에 관계되는 전달함수로 2-자유도 파라미터는 η 만, P, I, D 파라미터는 모두 포함하고 있어 외란에 대해서는 P, I, D 파라미터가 부담하게 됨을 알 수 있다.

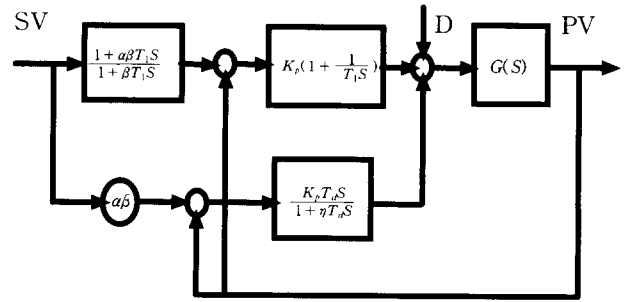


그림 5. 2-자유도 PID 제어기.
 Fig. 5. 2-DOF PID controller.

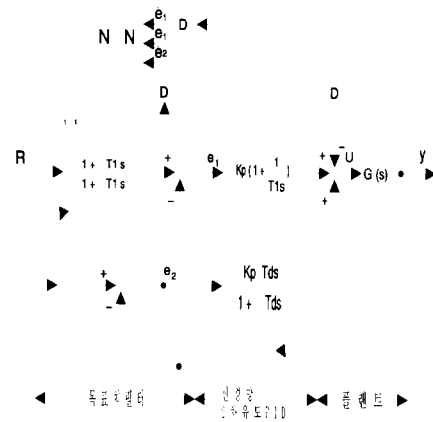
$$G_{pm}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} - \frac{T_d s}{1 + \eta T_d s} \right) \quad (3)$$

$$G_{sm}(s) = K_p \left(\alpha + \frac{1}{T_i s} - \frac{(1 - \alpha)(\beta - 1)}{1 + \beta T_i s} \right) + \frac{\alpha \gamma T_d s}{1 + \eta T_d s} \quad (4)$$

이에 반해 (4)는 설정치에 관계되는 전달함수로 2-자유도의 각 파라미터 $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ 가 모두 포함되어 있어 설정치에 대해 강인한 제어가 가능하다. 따라서 이들 파라미터를 적당히 튜닝만 하면 외란 및 설정치에 대해 모두 만족스런 제어가 가능하다.

2. 튜닝 방법

2.1 제어기 파라미터 튜닝



(a) 신경망을 구비한 제어 시스템 블럭도



(b) 신경망의 구조

그림 6. 신경망 2-자유도 PID 제어기.

Fig. 6. Neural network 2-DOF PID controller.

2-자유도 PID제어기의 튜닝은 기존의 일반 PID 제어기와 같이 Ziegler-Nichols법, 한계감도법, 모델매칭법 등이 주로 이용되고 있는데 지금까지 원자력 발전소의 증기 발생기 수위제어계통용 PID제어기에 이용되고 있는 것도 이것들이 주로 이용되고 있다[7]. 본 연구에서는

그림 5의 2-자유도 PID 제어기의 튜닝에 그림 6과 같은 구조를 한 신경망을 이용하였다.

여기서 (4)의 분모를 변형시키면

$$\begin{aligned} \text{분모} = & K_p [1 + (\alpha - 1)\beta] \left(1 + \frac{1}{[1 + (\alpha - 1)\beta T_i s]} \right) \\ & + \frac{1}{1 + (\alpha - 1)\beta} \left[\frac{T_d s}{1 + \eta T_d s} + \frac{(\alpha - 1)(1 - \beta)\beta T_i s}{(1 + \beta T_i s)} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

가 되므로 이때 $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ 의 값을 적당히 조절하면 튜닝이 된다. 여기서 튜닝에 필요한 각각의 계수는 다음과 같이 정한다.

$$\begin{aligned} K_p^* &= K_p / [1 + (\alpha - 1)\beta] \\ K_i^* &= K_i / [1 + (\alpha - 1)\beta] \\ K_d^* &= K_d / [1 + (\alpha - 1)\beta] \end{aligned} \quad (6)$$

이 관계를 이용하여 오차신호 e_1, e_2 을 신경망에 도입하여 즉, 제어기 입력에 들어가는 오차를 검출하여 오차가 가장적도록 α, β, η 값을 조절하면 (5)에 의해 K_p, K_i, K_d 가 튜닝된다. 이때 최적의 응답상태에서 2-자유도 PID 신경망 제어기의 초기치 설정치와 각각의 이득은 표 1과 같다.

표 1. 파라미터 학습 초기치.
Table 1. Initial value for the parameters.

파라미터	Value
K_p	1.15
T_i	250
T_d	0.5
α	0.7
β	0.1
γ	0.5
η	0.4

2.2 기존의 PI제어기의 이득

지능형 제어기의 초기 학습시간 동안의 시스템 초기상태의 안정성을 보장하기 위해 동작하며, 이 제어기의 출력 u_1 은 신경망 제어기의 학습값으로 쓰인다.

2.3 신경망 제어기

신경망은 PD제어기의 출력 u_1 을 학습 데이터로 사용하여 u_1 의 값이 최소화되는 방향으로 학습하게 되므로 전체시스템의 오차를 최소화하는 방향으로 학습하는 의미와 같다. 학습에 쓰인 알고리즘은 일반적으로 많이 쓰이는 역전파 학습 알고리즘을 사용했다.

시스템에 실제로 투입되는 입력값은 $u = u_1 + u_2$ 가 된다. 따라서 전체 제어기 형태는 PID형태를 이루게 되므로 시스템의 초기 급격한 변화나 상승시간의 개선 등을 PD제어기가 담당하고, 신경망은 정상상태의 오차나 외란에 따른 변화를 담당하는 역할을 하여 마치 I(비례)요소를 갖는 형태를 이루고 있다. 그때 각각의 제어기 입력과 학습 알고리즘은 다음과 같고 사용한 학습방법은 역

전파법을 이용하였다.

PD제어기 : $u_1 = K_p e + K_d \dot{e}$

NN 제어기의 학습 알고리즘 : $\Delta W_{ij} = \eta f'(x) Out_{q_i} u_i$

V. 시뮬레이션 및 결과 고찰

그림 7은 주어진 시스템에 기존의 PI제어기를 이용한 경우 증기 유량변화를 계단상으로 가변시켰을 때 리액터 출력, 주 급수 유량, 증기 발생기 수위변화상태를 나타낸 것으로 계단상으로 변화하는 부분에서 주 급수 유량이 심하게 진동하고 있음을 보이고 있다. 또 증기 발생기의 수위는 초기 250[sec]부분까지는 매우 심하게 진동하고 있는데 이것은 초기 저부하 운전시 제어상태가 원활하지 않음을 보이는 것으로 이러한 특성은 현재 국내 발전소 운전 데이터 및 문제점과도 일치함을 보이고 있다. 특히 초기의 급수 유량과 계단상 변화점에서 심하게 진동하고 있는데 이것은 증기 발생기의 운전 시작점이나 계단상 변화 부분에서 증기변화시 내부의 응축 및 팽창 효과가 심하게 일어난다고 볼 수 있다.

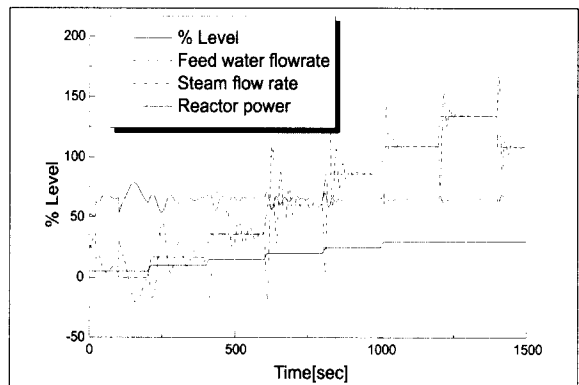


그림 7. PI 제어기의 수위 제어 결과.
Fig. 7. Resulting level by the conventional PI controller.

한편 그림 8은 같은 조건의 시스템에 PI제어기를 설정치보다 외란에 강인성을 갖도록 파라미터를 설정한 후 적용한 것으로 그림 7과 달리 주 급수 유량의 변화는 훨씬 안정한 상태를 보이고 있으나 수위변화는 그림 7과 같은 상태이다. 그림 9는 외란 강인성에 주로 초점을 맞추고 제어기의 출력 신호를 확인하기 위해 시뮬레이션 한 것으로 제어기 출력신호는 유량의 변화와 매우 일치함을 보이고 있다. 그림 10은 2-자유도 PID 제어기를 적용하고 시뮬레이션 한 것으로 증기 발생기의 수위, 주 급수 유량 모두 기존의 PI제어기와 달리 안정한 결과를 나타내고 있다. 그림 10의 튜닝은 설정치 변화에 만족하도록 파라미터를 결정 한 후 나머지 파라미터를 튜닝 한 것으로 변화부분에서 오버슈트가 있는점이 개선된 것으로 보인다. 한편 그림 11은 같은 조건의 2-자유도 PI 제어기를 외란에 강인성을 갖도록 모든 파라미터를 결정 한 것으로 초기 유량변화에 대한 언더슈트 및 진동이 없고 증기의 계단상 변화시에도 오버슈트가 적게 나타나고 있다. 이러한 결과에 의해 본 2-자유도 PID제어기의 특성

은 외란 및 설정치에 대해 모두 안정한 제어가 될 수 있고 특히 파라미터를 우선 외란에 강인하도록 튜닝하면 제어시 안정한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

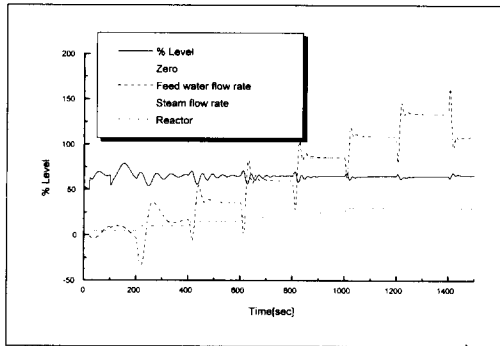


그림 8. 외란에 대한 PI 제어기의 수위 제어 결과.
Fig. 8. Resulting level to the disturbance by the conventional PI controller.

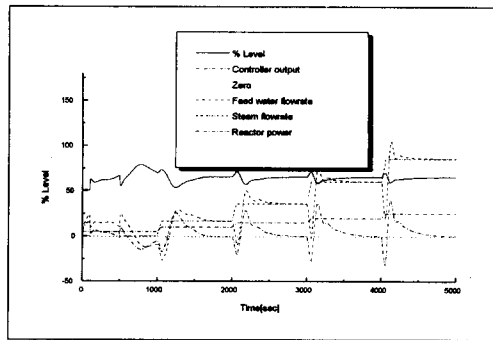


그림 9. 외란에 대한 PI 제어기의 수위 제어 결과.
Fig. 9. Resulting level to the disturbance by the conventional PI controller.

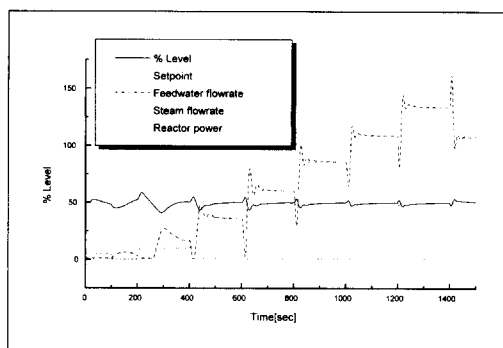


그림 10. 설정치 변화에 대한 2-자유도 PID 제어기의 수위 제어 결과.
Fig. 10. Resulting level to the setpoint by the 2-DOF PID controller.

VI. 증기 발생기를 이용한 실험 및 결과고찰

1. 실험장치 구성

증기 발생기의 팽창, 수축 현상과 2-자유도 PID 제어기의 특성을 실험하기 위해 모의 증기 발생 장치를 제작하였다. 본 실험장치는 증기발생기 수위 제어가 가장 문제로 되는 swell, shrink현상을 고찰하고 이 현상이 발생

할 때 수위제어를 원활히 할 수 있는 제어기를 개발하는 것으로 본 연구에서는 앞서 시뮬레이션 한 방법을 적용하여 실험하였다.

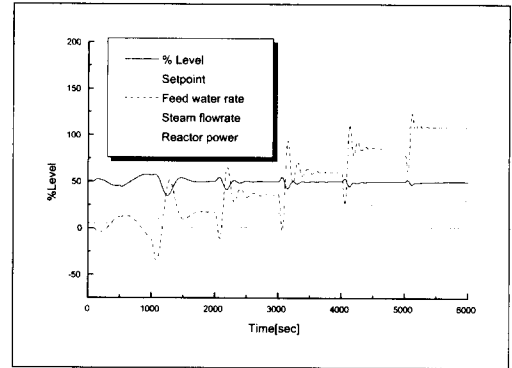


그림 11. 설정치 변화에 대한 2-자유도 PID 제어기의 수위 제어 결과.

Fig. 11. Resulting level to the setpoint by the 2-DOF PID controller.

그림 12는 모의 실험장치 구성도로 증기 발생기는 팽창 및 수축 효과가 잘 발생하도록 내부 구조를 설계하였고 열원은 전기 히터를 이용하였다. 주 증기 밸브는 글로브 밸브를 이용하였고 증기발생기의 정보를 얻기 위해 온도계, 압력계, 레벨계를 이용하였다. 이들 정보는 제어 패널을 거쳐 PC상에서 수위, 압력, 온도의 데이터가 얻어진다. 한편 SW, 밸브 등의 조작은 조작용 PC를 통해 이루어진다.

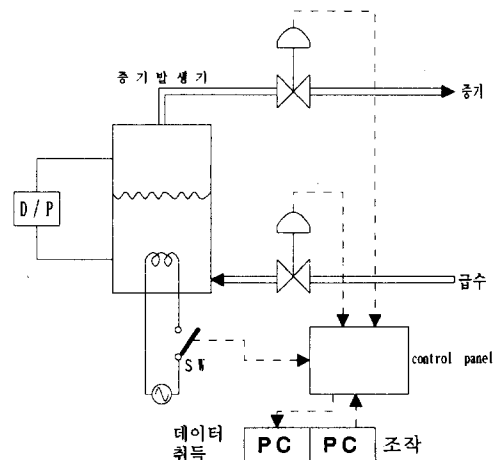


그림 12. 실험장치 시스템 블록도.
Fig. 12. The block diagram of the experimental system.

그림 13은 모의 증기 발생기 내부 구조도로 가능한 실제의 증기발생기와 유사하도록 내부구조를 제작하였다. 그림 14는 제작한 실험장치의 사진을 나타낸다.

2. 실험 방법

실험은 압력 10 [kg/cm²], 온도 150[°C], 수위 60[%]에서 swell, shrink상태와 제어기 성능 실험을 하였다. 팽창 및 수축실험은 증기밸브를 초기 2초간은 닫음을 유지하다가 열림동작(1.5초)-인터벌(1.5초)-닫음동작(1.5초)-인

터빌(1.5초) 동작을 250초간 반복하므로써 증기덤프에 의한 수축 및 팽창효과를 볼 수 있도록 하였다. 이와 같은 실험은 히터온, 히터오프, 주 급수 밸브 닫음, 20%열림, 30%열림, 50%열림 등 여러 가지 방법으로 수행하였다.

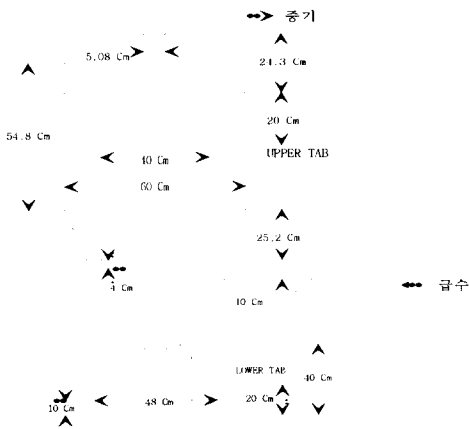


그림 13. 증기 발생기 내부 구조도.
Fig. 13. The inner structure of steam generator.



그림 14. 실험장치 사진.
Fig. 14. The photo of the experimental system.

3. 실험결과 및 고찰

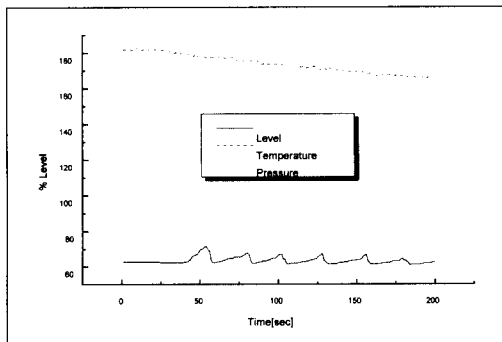


그림 15. 급수밸브 100% 열림시 제어가 없을 때 실험 장치에 의한 팽창 수축효과.
Fig. 15. Shrinking and swelling in noncontrolling on exrimental system in 100% opening of feed water valve.

그림 15는 제어를 적용하지 않고 주 급수 밸브를 100% 연 상태에서 주 증기 유량의 가변에 따라 발생하는 팽창, 수축특성을 실험용 증기 발생기를 이용해 실험한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 증기 발생기의 수위는 증기 유량가변에 따라 진동(팽창 및 응축효과)이 심하게 발생함을 알 수 있는데 이 결과는 결국 증기 발생기의 수위제어에 많은 어려움이 발생하는 원인이 됨을 제시하고 있다.

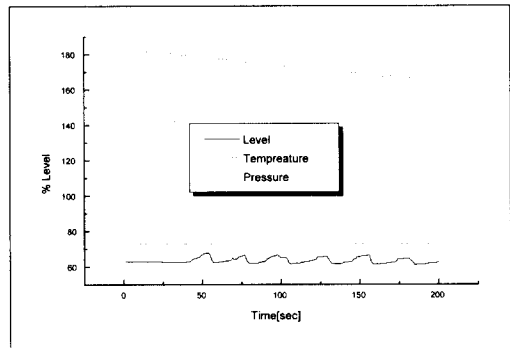


그림 16. 급수밸브 100% 열림시 PI 제어기에 의한 팽창수축 실험결과.
Fig. 16. Experimental results of swell and shrink by PI controller in 100% opening of feed water valve.

한편 그림 15의 압력변화 특성은 주 증기의 온,오프에 따라 압력 진동은 없으나 시간이 따라 적어지고 있다. 또 온도특성도 주 증기 밸브 온,오프에 따라 진동은 없고 시간에 따라 낮아지고 있는데 이것은 주 증기의 가변에 의해 증기가 배출됨으로서 증기 발생기내의 온도, 압력이 저하하기 때문인 것으로 볼 수 있다. 그림 16은 기존의 PI제어기를 같은 실험조건으로 적용하고 기존의 PI제어기를 적용한 실험 결과로 제어를 적용하지 않은 경우의 그림 15에 비해 팽창 수축 효과는 적게 나타나고 있으나 완전히 제거 할 수는 없음을 나타내고 있다.

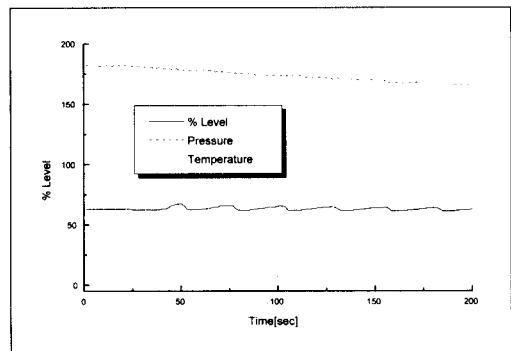


그림 17. 급수 밸브 100% 열림시 신경망 2-자유도 제어기에 의한 팽창, 수축 실험결과.
Fig. 17. Experimental results of swell and shrink by neural network 2-DOF controller in 100% opening of feed water valve.

한편 그림 17은 같은 실험조건에 신경망 2-자유도 제

여기를 적용하고 실험한 결과로 기존의 PI제어기를 적용한 것에 비해 현저히 응축 및 팽창효과가 축소되었음을 알 수 있다.

이와같이 PI제어기를 적용한 경우에 비해 2-자유도 제어기가 안정한 결과를 보이고 있는 것은 2-자유도 제어기의 외란억제 특성을 갖는 파라미터 α, β, γ 를 이용해 외란 요소인 주 급수 유량과 주 증기 유량 사이의 특성을 반영하여 외란억제 제어가 가능하고 또 신경망의 학습 기능을 활용하여 프로세스의 오차를 적게 하도록 각 파라미터를 조절할 수 있기 때문으로 볼 수 있다.

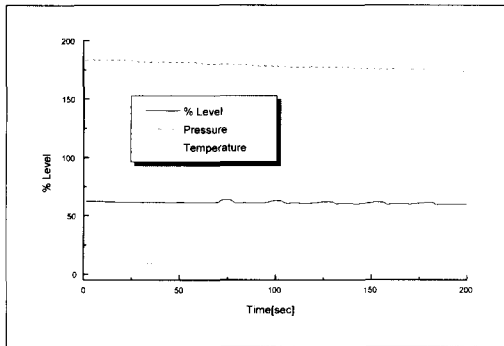


그림 18. 급수 밸브 30% 열림시 신경망 2-자유도 제어기를 이용한 팽창수축 실험결과.

Fig. 18. Experimental results of swell and shrink by 2-DOF controller in 30% opening of feed water valve.

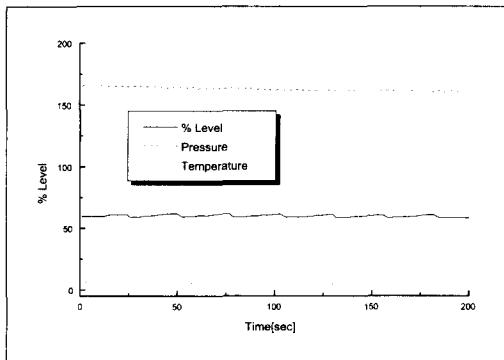


그림 19. 히터-온, 급수밸브 30% 열림시 신경망 2-자유도 제어기를 적용한 수위 제어 실험결과.

Fig. 19. Resulting level by 2-DOF controller in heating and 30% opening of feed water valve.

한편 그림 18은 신경망 2-자유도를 적용하고 급수 밸브를 30% 열린 상태에서 실험한 것으로 100% 열린 상태에서 실험한 그림 17에 비해 팽창수축 효과가 적게 나타나고 있는데 이것은 급수의 냉각 효과가 수위 변화에 큰 영향을 미치는 것을 의미하는 것으로 볼 수 있다.

그림 19, 20은 히터의 온-오프에 의한 팽창 수축 효과의 특성을 고찰하기 위해 급수밸브를 30% 열린 상태에서 히터를 온 또는 오프하고 실험한 것으로 본 실험장치에서는 히터의 온, 오프에 의해 수위변화는 나타나지 않고 있다.

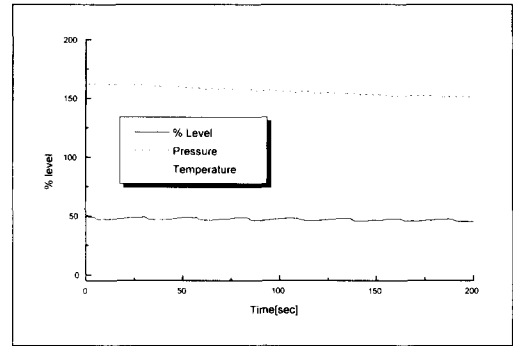


그림 20. 히터-오프, 급수밸브 30% 열림시 2-자유도 제어기의 수위제어 실험결과.

Fig. 20. Resulting level in heater off of 2-DOF controller in 30% opening of feed water valve.

4. 시뮬레이션과 실험결과의 관계고찰

그림 7-11에서의 시뮬레이션 결과는 컴퓨터 프로그램을 이용해 원자로 출력을 계단상으로 증가 시켰을 때 원자로 출력변화에 따른 증기발생기의 수위변화 현상을 고찰한 것으로 증기발생기의 수위는 증기발생기내의 팽창, 수축현상에 의해 진동특성을 나타내고 있어 이 시뮬레이션 결과는 이론상 제시되어 있는 현상과 잘 일치한다 [2]-[5].

한편 본 논문에서는 이러한 현상을 실험장치를 이용해 규명하고자 실험장치를 제작하여 실험 하였는데 그림 15-20은 실험장치를 이용해 실험한 결과이다. 실제의 원자로 운전방식에서 정상 출력시는 큰 문제가 없으나 원자로 출력이 변하는 경우는 증기 발생기의 급수도 가변시켜야 함으로 수위변화가 발생하고 이때 팽창, 수축 현상으로 증기발생기내에 가상수위를 형성하여 제어시 문제점을 일으킨다. 종래의 PI제어기를 이용하는 경우는 증기발생기에 대한 정확한 제어가 어려웠던 것으로 보고 되고 있다[4]-[5]. 따라서 본 연구에서는 신경망 2-자유도 PID제어기를 이용해 팽창, 수축현상을 억제함으로써 효과적으로 제어 할 수 있는 방법을 시뮬레이션과 실험적으로 규명하고자 하였다. 그림 17과 18은 실험장치에 본 논문에서 제시한 제어기를 적용한 경우 결과로 기존의 것에 비해 안정된 결과를 나타내고 있는데 이는 실험장치상에서 발생하는 팽창, 수축현상 억제효과에 신경망 2-자유도 PID제어기의 성능이 효과적으로 작용하고 있음을 잘 입증한다고 볼 수 있다.

그림 7-11의 시뮬레이션한 결과와 실험한 그림 15-20의 공통점은 주 증기의 유량 및 급수변화가 증기 발생기의 수위변화에 영향을 미칠 수 있는 팽창, 수축특성을 일으키는 것이다. 그림 7-11 시뮬레이션에서는 원자로의 부하를 증가 시키면서 실험을 하였는데 이것은 실제의 원자로 운전시와 같은 조건에서 특성을 보고자 한 것이다. 시뮬레이션과 실험장치상에서 확인 할수 있었던 공통점은 주 급수의 영향이 증기 발생기의 수위변화에 큰 영향을 미치는 것으로 그림 17과 18에서 잘 나타나고 있

다. 한편 그림 15-20의 실험장치에서 계단상으로 출력을 증가시키면서 실험하기 위해서는 막대한 용량의 히터를 추가로 설치하여 히터용량을 계단상으로 온하면서 실험하여야 하는데 이것은 실험장치의 용량 한계상 실험이 어렵기 때문에 반대로 주 증기 유량을 감소(출력)키면서 급수의 유량변화에 따른 수위특성을 실험하였다. 그러나 향후 실험장치를 개조하여 부하 증가에 따른 문제도 더욱 연구해야 할 과제로 남겨두고 있다.

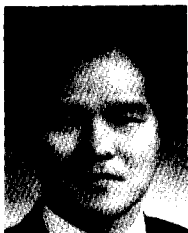
VII. 결론

본 논문에서는 신경망 2-자유도 PID제어기를 증기 발생기의 수위제어계통에 적용하여 안정하게 제어를 할수 있는 방법을 제시하고 시뮬레이션과 실험을 통해 연구하였다. 지금까지는 증기발생기의 수위제어계통에 PI제어기만을 이용해 제어하여 왔는데 이러한 PI제어기는 제어알고리즘 및 튜닝 방법에 있어서 한계가 있어 외란 발생시의 외란억제 기능은 물론 설정치 추종성능도 좋지 못하다. 따라서 많은 연구자들에 의해 여러 가지 방법으로 개선하고자 하는 연구는 이루어지고 있으나 현대제어 이론이나 기타 새로운 알고리즘의 도입은 실현성에 있어서는 한계가 있다. 본 논문에서는 PI제어기와 같으나 강인성이 우수한 2-자유도 PID제어기를 적용하고 튜닝은 신경망을 이용하여 주 급수 유량, 주 증기 유량, 급수온도 및 냉매온도 변화등의 외란에 대한 강인성도 있고 설정치 추종 성능도 우수한 제어방법을 제시하고 시뮬레이션하여 기존의 PI제어기와 비교 검토하였다. 증기 발생기의 외란 발생 파라미터를 2-자유도 PID 제어기의 튜닝 파라미터 α, β, γ 에 인가하고 설정치는 기존의 P, I, D 파라미터가 부담하도록 함으로서 외란과 설정치 변화 모두에 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

이들 제어기의 성능은 축소형 증기 발생기상에서 실험을 한 결과 기존의 제어기 이용시는 팽창 및 수축 효과가 매우 심하게 일어나 제어에 어려움이 발생하나 본 연구에서 제안한 제어기를 적용한 결과 매우 팽창 및 수축 효과가 적게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

참고문헌

- [1] T. W. Kerlin & E. M. Katz, "Theoretical and experimental dynamica analysis of the H. B. Robinson Nuclear plant, Nuclear Technology, vol. 30, pp. 299-316, Sept., 1976.
- [2] Takshi et al., "Application of fuzzy logic control system for reactor feed-water control," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 74, pp. 61-72, 1995.
- [3] 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.
- [4] John G. Williams, "Intelligent control in safety systems," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 40, no. 6, pp. 2040-2044, 1993.
- [5] 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.
- [6] 박기용, "증기 발생기 수위제어를 위한 퍼지제어 학습 시스템 개발에 관한 연구," 한국과학기술원 박사 학위논문, 1996.
- [7] 田口秀文, "2自由度 PID制御系の最適パラメータ," *SICE*, vol. 23, no. 9, pp. 889-895, 1988.
- [8] 김동화, 이원규, "원자력 발전소에 대한 지능형 PID 제어기 응용연구," 기초전력 공학 공동 연구소 보고서, 1997, 9.



김 동 화

1991년 2월 아주대학교 박사과정 졸업(공학박사). 1977년 12월 15일~1993년 3월 한국원자력 연구소 계장기술실 근무. 1985년 11월~1986년 11월 캐나다 원자력 연구소 공동연구(Computer-aided multivariable control system design). 1993년 3월~1996년 현재 대전산업대학교 제어계측공학과 조교수.



이 원 규

1974년 송전대학교 전기공학과 졸(공학사). 1976년 고려대학교 전기공학과 졸(공학석사). 1991년 아주대학교 전자 공학과 졸(공학박사). 1978년~1998년 현재 대전산업 대학교 전기공학과 교수.