

# PI-신경망 제어를 이용한 원자력 발전소용 증기 발생기 수위제어

(The level control of Steam Generator in Nuclear Power Plant  
by Neural network-PI Controller)

김 동 화  
(Dong-Hwa Kim)

## 요 약

본 연구에서는 증기유량, 증기온도, 주 급수 온도 및 유량등과 같은 외란에 의해 증기발생기의 응축 및 팽창효과가 발생하여 수위조절에 어려움이 발생하는 문제를 신경망-PI제어를 이용해 효과적으로 제어하는 연구를 하였다.

종래의 PI제어기는 저 출력에서 효과적으로 제어 할 수 없어 기동시는 숙련자의 노련한 기술이 필요한데 반해 본 연구에서 적용한 신경망 PI제어기는  $K_p, T_i$  파라미터를 외란에 영향을 줄 수 있는 파라미터를 고려하여 신경망을 이용해 튜닝함으로써 응축 및 팽창효과를 줄이고 외란 및 설정치 변경에 대해 효과적으로 제어 될 수 있음을 실험과 시뮬레이션을 통해 확인 할 수 있었다.

## Abstract

It is difficult to control for the level of the steam generator in the nuclear power plant because there is swell and shrink, and many disturbance such as, feed water rate, feedwater temperature, main steam flow rate, coolant temperature effect steam generator level.

If the conventional PI controller use in this system, we cannot have a stability in the control of the lower power, the rejection function of disturbance, and the load following effectively.

In this paper, we study the application of the of neural network based  $K_p, T_i$  for PI controller to the level control of the steam generator of nuclear power plant through the simulation and experimental on the steam generator.

We are satisfied with the resulting against the interrupt of the disturbance, the change of setpoint through the simulation and the swell and shrink, the response of controller on the experimental steam generator.

## 1. 서 론

증기발생기는 원자로의 열출력을 받아 증기를 받

생시켜 터빈에 증기를 공급하기 위한 설비로 수위는 주급수유량 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

\*정회원 : 대전산업대 제어계측공학과 교수.  
접수일자 : 1997. 9. 30.

왔다[1~4].

특히 저부하 운전시 원자로 출력에 안전하게 추종 하면서 적정 수위를 유지하는 것은 안전운전상 매우 중요하여 숙련된 운전원의 운전기술이 필요하다.

증기 발생기 수위제어시 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 증가 함에 따라 에너지 공급원으로서 중요한 역할을 담당 하게 되어 플랜트 제어의 중요성은 날로 더해가고 있으나 운전의 안전성 문제로 새로운 제어 알고리즘의 적용이 어려워 기존의 PI제어기를 적용하고 있는 정도이다.

그러나 기동시나 저부하 운전시의 수동에 의한 운전으로 안전성 확보가 매우 어렵고 특히 숙련된 운전자의 노하우 확보가 안전성에 큰 영향을 미쳐 자동화의 필요성이 제기되는 부분이다.

증기 발생기의 수위 제어계통에 적용되고 있는 제어기는 PI제어기로 그 제어 알고리즘이 단순화 되어 있고 튜닝 기법도 매우 고전적인 방법을 이용하므로 외란제거 및 설정치 변화에 대한 추종 성능에 한계가 있다.

따라서 불규칙한 외란이 발생하거나 부하추종 성능을 향상시키기 위해서 설정치를 가변하는 경우는 원할한 제어가 어렵고 그만큼 운전원의 부담이 커지게 된다.

본 연구에서는 증기 발생기의 수위 제어시 부하변화나 증기 유량에 따라 발생하는 응축, 팽창 현상에 의해 수위변화가 불규칙하여 제어에 상당한 어려움을 겪고 또 새로운 제어 알고리즘의 응용이 제한되어 있는 점을 고려하여 기존의 PI제어기에 신경망을 접목시켜 적용하는 문제를 연구하였다[8].

본 연구에서는 시뮬레이션과 축소 제작한 모형 증기발생기상에서 직접 응축 및 팽창 효과를 시험하고 이 때 설계한 제어기의 성능을 적용하여 시험하였다. 이들 결과는 기존의 PI제어기와 비교함으로써 성능의 우수성을 비교 검토하였다.

## 2. 증기 발생기 수위제어 방법 및 문제점

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 운전특성상 새로운 제어 알고리즘의 적용이 어려워 다른 프로세스에서 이용되고 있는 다양한 제어이론이나 응용방법에 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 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.

## 3. 신경망-PI제어기 설계를 위한 증기발생기의 제어 파라메터 도출

증기발생기의 모델은 제작회사에 따라 달라 여러가지가 제시되고 있는데 본 연구에서 사용한 모델은

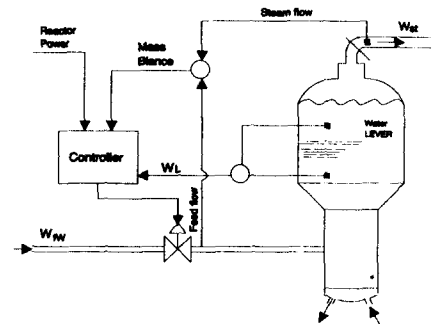


그림 1. 증기 발생기의 수위제어계통  
Fig. 1. Level control system of Steam generator

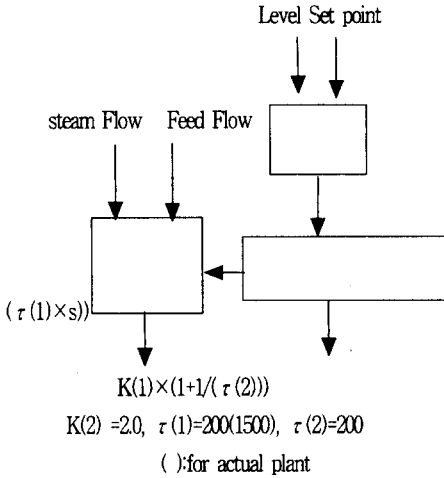


그림 2. 주 급수밸브 PI제어기  
Fig. 2. PI Controllers for Main FW Valve

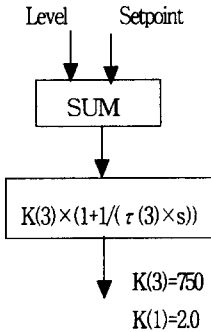


그림 3. 바이패스 밸브 PI제어기  
Fig. 3. PI Controller for FW Bypass Valve

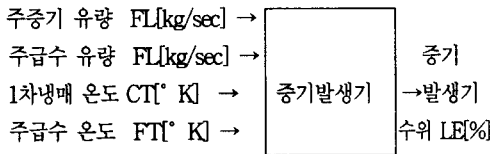


그림 4. 증기 발생기의 수위변화에 미치는 변수  
Fig. 4. The affecting parameter to level variation of steam generator

그림 4와 같이 증기발생기 수위변화에 영향을 미칠 수 있는 변수들을 주급수유량, 증기유량, 1차측 냉매온도, 주 급수온도 4개의 변수로 정의하고 이들 변수의 영향에 의해 증기 발생기의 출력(수위)이 변하는 것으로 하였다[5~6].

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 모델링을 하고 그 결과에 의해 각각의 파라메타가 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

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

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

$$G_3(s) = \left[ \frac{k_4(a_3 - b_3)s}{(s+a_3)(s+b_3)} + \frac{c_3k_5}{s+c_3} \right] e^{-d_3s},$$

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

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

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

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

$$\omega_m = \frac{\pi}{t_{d1} \sqrt{1 - \zeta_1^2}}$$

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

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

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

$$a_3 = \begin{cases} 0.0195P + 0.0846, & 0 < P \leq 10 \\ 0.0107P + 0.1725, & 10 < P \leq 15 \\ 0.0082P + 0.21, & 15 < P \leq 20 \\ 0.0125P + 0.1240, & 20 < P \leq 30 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 b_3 &= a_3/10 \\
 c_3 &= \begin{cases} 0.399P - 1.99, & 0 < P \leq 10 \\ 2, & 10 < P \leq 30 \end{cases} \\
 k_6 &= 4.43 \times 10^{-4} e^{0.0348P} \\
 t_{\mu} &= 195e^{-0.16P} + 22 \\
 \zeta_4 &= 0.535e^{-0.16P}, 0 < P \leq 15 \\
 &0.172, 15 < P \leq 30 \\
 \omega_m &= \frac{\pi}{t_{\mu} \sqrt{1 - \zeta_4^2}}
 \end{aligned}$$

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

### 4. 수위제어용 신경망 2-자유도 PI제어기

#### 4.1 제어 알고리즘

본 연구에서 사용한 PI제어기는 그림 5와 같은 구조를 갖는다[8].

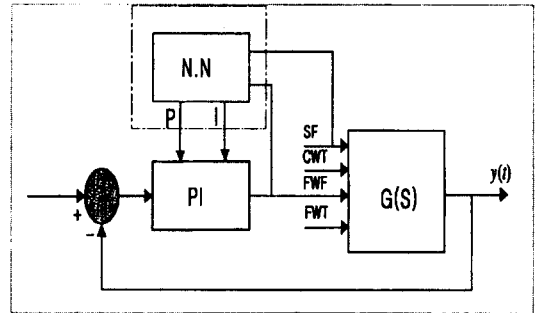
종래의 원자력 발전소의 수위 제어에는 PI제어기만을 이용하였으나 본 논문에서는 PI제어외에 주 급수 유량과 주 증기 유량변화에 대해 신경망을 이용해 학습하고 신경망의 결과를 PI수위 제어기의 파라미터를 튜닝하는데 이용하였다.

그림에서 주 급수 유량, 주 증기 유량, 1차냉매 온도, 주 급수 온도에 따라 각 변수는 서로 관계가 있어 영향을 미치게 되나 이러한 영향을 실질적으로 계산하는 것은 불가능하다.

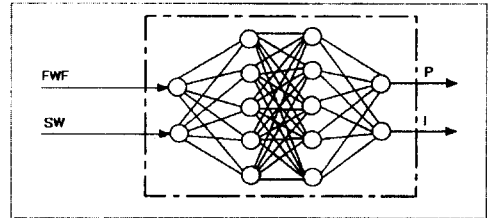
따라서 본 연구에서는 이러한 영향을 고려하는데 계산이 필요치 않고 입,출력 특성만으로 제어에 필요한 정보를 얻어 PI제어기를 튜닝 할 수 있도록 신경망을 이용하였다.

실제의 제어계통에 맞는 제어기를 설계하기 위해 수위에 가장 크게 영향을 미칠것으로 예상되는 주 증기 유량과 제어기의 출력 신호를 받아 이들의 차에서 생기는 오차를 학습기능을 갖는 신경망을 이용해 오차를 감소 시키도록 PI제어기의 파라미터를 튜

닝하도록 하였다. 이와같이 시스템을 구성하는 경우 주 증기 유량에 의한 응축 및 팽창효과가 증기 발생기 수위에 영향을 미칠 수 있는 인자를 고려하고 이때 제어 되어야 할 제어 신호의 량을 반영하여 오차를 학습하게 됨으로서 예견제어 기능을 할 수 있어 그 만큼 안정한 효과가 있다.



a) 제어 시스템



b) 신경망 구조

그림 5. 증기 발생기용 신경망 PI제어기 구조  
Fig. 5. The structure of neural network PI controller for the level control of steam generator

### 5. 시뮬레이션 및 결과고찰

그림 6은 주어진 시스템에 기존의 PI제어기를 이용한 경우 증기 유량의 계단상 변화에 대한 리액터 출력, 주 급수 유량, 증기 발생기 수위변화 상태를 나타낸 것으로 계단상 변화 부분에서 주 급수 유량의 변동이 심하다.

또 증기 발생기 수위는 초기 시동에서 250[sec]까지 매우 심하게 진동하고 있는데 이것은 초기 저부하 운전시 제어상태가 원할하지 않아 저부하 운전시

수동운전 하는 현상을 잘 나타내고 있다[8].

이러한 현상은 운전 시작점이나 계단상 변화 부분에서 증기변화시 내부의 응축 및 팽창 효과가 심하게 일어난다고 볼 수 있다.

한편 그림 7은 같은 조건의 시스템에 신경망-PI제어를 적용한 것으로 수위변화는 훨씬 안정한 상태를 보이나 주 급수 유량의 변화는 그림 6과 같은 상태이다.

그림 8은 기존의 PI제어기 적용시 보충수 유량변화에 대한 수위특성으로 증기 유량 변화시와 유사한 모양을 보이고 있다.

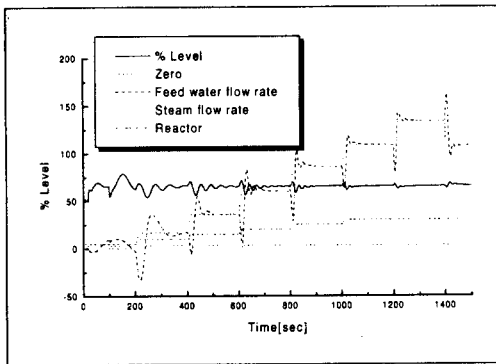


그림 6. 주 증기 유량 가변시 PI제어기의 수위제어 결과

Fig. 6. Resulting level by the conventional PI controller to steam flowrate variation

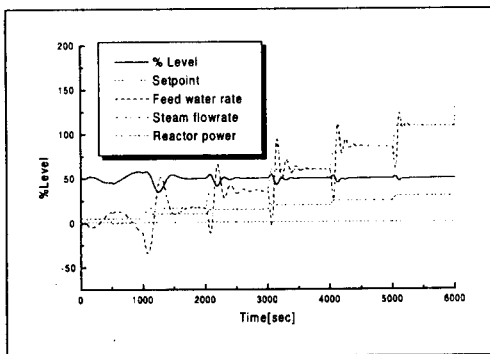


그림 7. 신경망 PI제어기의 수위 제어 결과  
Fig. 7. Resulting level to the disturbance by the neural network-PI controller to steam flowrate variation

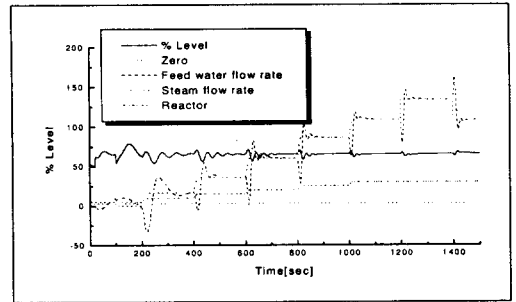


그림 8. 보충수 유량에 대한 PI제어기의 수위 제어 결과

Fig. 8. Resulting level to the feedwater flowrate by the conventional PI controller

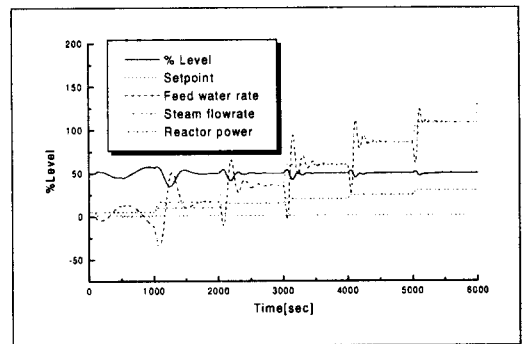


그림 9. 보충수 유량에 대한 신경망-PI제어기의 수위 제어 결과

Fig. 9. Resulting level to the feedwater flowrate by the neural network-PIcontroller

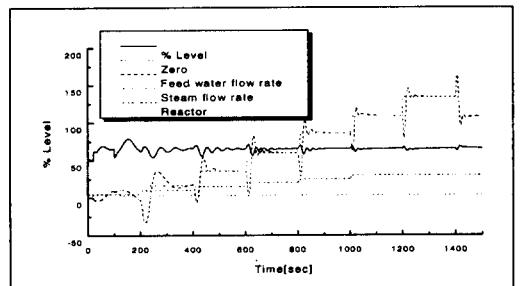


그림 10. 원자로 출력에 대한 기존의 PI제어기의 수위 제어 결과

Fig. 10. Resulting level to the reactor output by the conventional controller

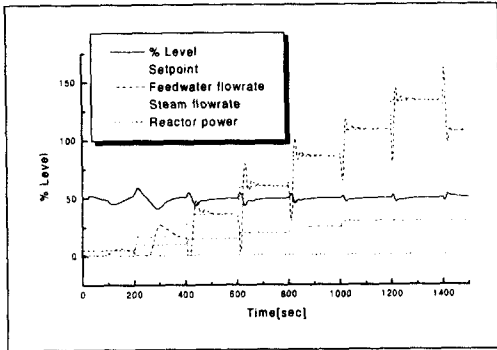


그림 11. 원자로 출력에 대한 신경망-PI제어기의 수위 제어 결과  
 Fig. 11. Resulting level to the reactor output by the neural network-PI controller

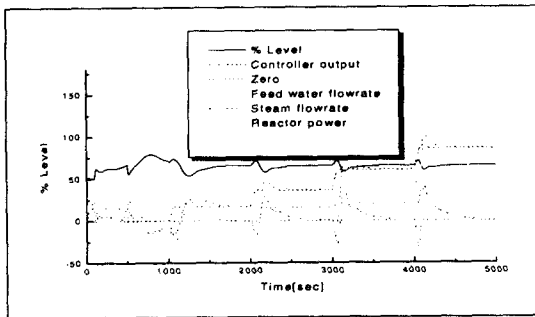


그림 12. 설정치 변화에 대한 신경망-PI제어기의 수위 제어 결과  
 Fig. 12. Resulting level to the setpoint by the neural-network-PIcontroller

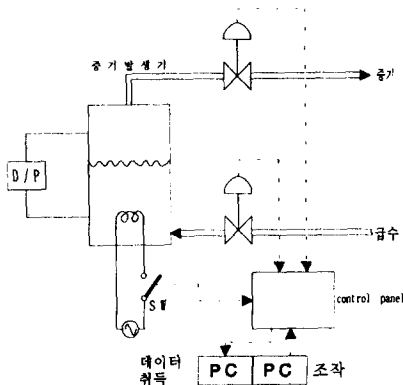


그림 13. 실험장치 시스템 블록도  
 Fig. 13. The block diagram of the experimental system

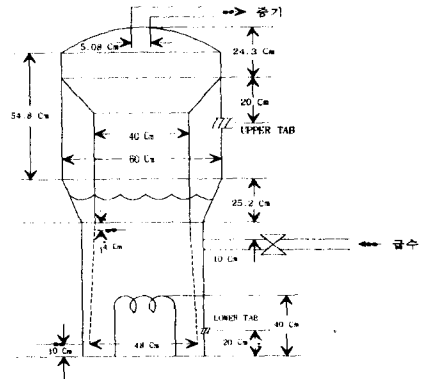


그림 14. 증기발생기 내부 구조도  
 Fig. 14. The inner structure of steam generator

한편 그림 10은 기존의 PI제어기 적용시 원자로 출력 변화에 대한 응답으로 그림 6의 증기 유량 변화시의 유사한 결과를 보이고 있는데 이것은 주 증기 유량 변화는 원자로 출력과 일치한다는 물리적인 현상과도 일치한다.

한편 그림 11은 신경망-PI제어기의 원자로 출력에 대한 수위변화특성으로 증기의 계단상 변화시에도 오버슈트가 적게 나타나고 있다.

이러한 결과에 의하면 본 연구에서 사용한 신경망-PI제어기의 특성은 외란에 대해 기존의 PI제어기만의 경우에 비해 안정한 제어결과를 얻을 수 있음을 알수 있다.

## 6. 증기 발생기를 이용한 실험 및 결과고찰

### 6.1 실험장치 구성

본 연구에서는 증기발생기 수위 제어가 가장 문제로 되는 팽창(swell) 및 응축(shrink)현상과 보충수 및 증기 유량과의 관계를 고찰하고 이 현상이 발생할 때 제어기 적용시 수위에 미치는 영향을 실험하기 위해 축소 제작한 증기발생기를 이용하였다.

그림 13은 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 제어판넬을 거쳐 PC상에서 수위, 압

력, 온도의 데이터가 얻어진다, 한편 SW, 밸브 등의 조작은 조작용 PC를 통해 이루어진다.

그림 14는 모의 증기 발생기 내부 구조도로 가능한 실제의 증기발생기와 유사하도록 내부구조를 제작 하였다.

### 6.2 실험 방법

실험은 압력 10 [ $kg/cm^2$ ], 온도 150[ $^{\circ}C$ ], 수위 60[%]에서swell, shrink상태와 제어기 성능 실험을 하였다.

팽창 및 수축실험은 증기밸브를 초기 2초간은 닫음을 유지하다가 열림동작(2초)-인터벌(2초)-닫음동작(2초)-인터벌(2초) 동작을 250초간 반복하므로써 증기덤프에 의한 수축 및 팽창효과를 볼 수 있도록 하였다.

이와같은 실험은 히터온, 히터오프, 주 급수 밸브 닫음, 20%열림, 30%열림, 50%열림 등 여러 가지 외란에 대한 특성을 고찰하기 위해 수행하였다.

### 6.3 실험결과 및 고찰

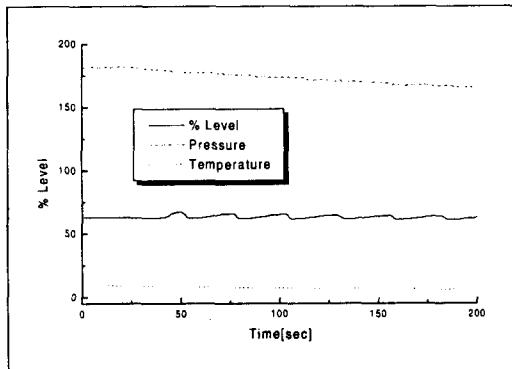


그림 15. 실험장치에 의한 팽창수축 실험결과  
Fig. 15. Shrinking and swelling on experimental system

그림 15는 주 증기 유량에 따라 발생하는 팽창, 수축특성을 실험용 증기 발생기를 이용해 실험한 결과이다. 그림에서 증기 발생기의 수위는 증기 유량에 따라 진동이 발생함을 알수 있는데 이러한 결과는 결국 증기 발생기의 수위제어에 많은 어려움이 발생하는 원인이 됨을 알수 있다.

그림 16은 기존의 PI제어기 적용시 제어 결과로

제어기를 적용하지 않은 것에 비해 현저히 응축 및 팽창효과가 축소 되었음을 알수 있다.

그림 17은 신경망-PI제어기 적용시 제어 결과로 기존의 제어기에 비해 진동상태가 적음을 보이고 있다.

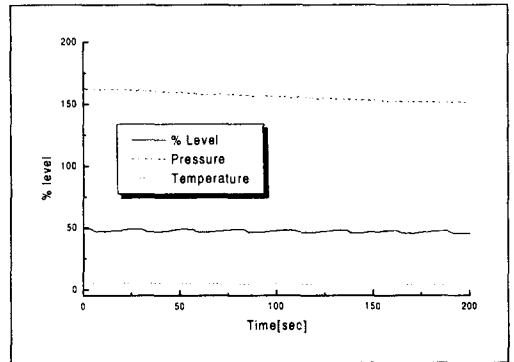


그림 16. 실험장치에 신경망을 이용한 수위제어 실험 결과  
Fig. 16. Results of level control by PI controller the experimental system

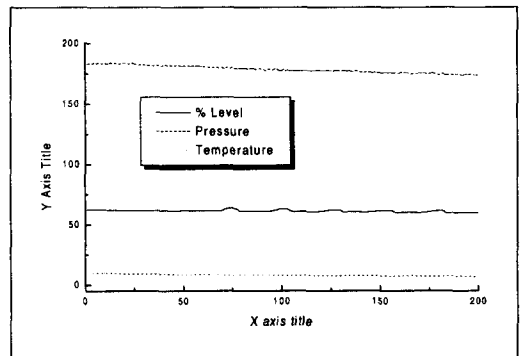


그림 17. 외란 적용시 신경망-PI제어기의 수위제어 실험결과  
Fig. 17. Resulting level of neural network-PIcontroller to disturbance

## 7. 결론

본 논문에서는 신경망-PI제어기를 증기 발생기의 수위제어시스템에 적용하여 안정하게 제어를 할수 있는 방법을 제시하고 시뮬레이션과 실험을 통해 연구 하였다.

증기발생기의 수위제어계통에는 주로 PI제어기만을 이용해 제어하여 왔는데 이러한 PI제어기는 제어 알고리즘 및 튜닝 방법에 있어서 한계가 있어 증기 유량 및 온도, 급수유량 및 온도 등과 같은 외란에 대해 제어결과가 좋지 못하다.

따라서 많은 연구자들에 의해 여러 가지 방법으로 개선하고자 하는 연구는 이루어지고 있으나 새로운 알고리즘의 도입은 실현성에 있어서는 한계가 있다.

본 논문에서는 기존의 PI제어기에 튜닝 방법을 신경망을 이용해 주 급수 유량, 주 증기 유량, 급수온도 및 냉매온도 변화등의 외란에 대한 강인성도 있고 설정치 추종 성능도 우수한 제어기 구조를 제시하고 시뮬레이션과 실험을 통해 연구하였다.

주 증기 유량 및 온도, 보충수 유량 및 온도 등과 같은 외란 적용시 기존의 PI제어기에 비해 만족 할 만한 결과를 얻을수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Zhao Yangping & Gao Huahun, "Analysis of a LOFT Atws event for PWR using the Autogressive model", IFAC, PP.73~80,1986.  
 [2] Takshi & etc,"Application of fuzzy logic control system for reactor feed-water control",Fuzzy Sets and Systems, Vol.74PP.61~72,1995.  
 [3] Zhichao Guo & etc,"Nuclear power plant performance study by using neural network",IEEE Transation on nuclear science Vol.39,No.4,PP.915-918,1992.

[4] John C.Williams,"Intelligent control in safety systems" IEEE Transation on nuclear science Vol.40,No.6, PP.2040~2044,1993.  
 [5] AlHoeld,"Atheoretical 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 시스템개발에 관한 연구",한국과학기술원 박사학위논문,1996.  
 [7] 田口秀文, "2自由度 PID制御系の 最適 ハラメタ", SICE, vol.23, no.9, pp.889~895, 1988.  
 [8] 김동화,이원규,"원자력 발전소에 대한 지능형 PID제어기 응용연구",기초전력 공학 공동 연구소 보고서, 1997.9.

◇ 저자소개 ◇

김 동 화 (金東和)  
 1991년12월 아주대 대학원졸(박사). 1985~1986년 캐나다 원자력 연구소 연구. 1977~1993년 한국원자력 연구소 계장 기술연구실. 1993년3월~1998년 현재 대전산업 대학교 제어계측 공학과 교수.