

## 신경회로망과 PI제어기를 이용한 중수로 핵연료 교체 로봇의 구동압력 제어

임대영<sup>1</sup>, 이창구<sup>1</sup>, 김영백<sup>1</sup>, 김영철<sup>2</sup>, 정길도<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>전북대학교 전자공학, <sup>2</sup>군산대학교 기계공학

## Design of a Neural Network PI Controller for F/M of Heavy Water Reactor Actuator Pressure

Dae Yeong Lim<sup>1</sup>, Chang Goo Lee<sup>1</sup>, Young Baik Kim<sup>1</sup>, Young Chul Kim<sup>2</sup>  
and Kil To Chong<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Electronic engineering, Chonbuk National University

<sup>2</sup>Mechanical engineering, Kunsan National University

**요 약** 현재 가동 중인 월성 원자력 발전의 핵연료 교체로봇 시스템을 살펴보면 핵연료 교환에 필요한 구동압력 제어를 위해 PI제어기를 사용한다. PI제어는 구조가 간단하고 이득 설정을 통해 시스템 요구조건에 만족하는 제어 성능을 낼 수 있지만 밸브와 관로 등의 파라미터 변화로부터 적절한 이득 변경 없이 안정한 제어가 힘들다. 이러한 문제를 해결하기 위해 PI제어기 이득을 동적으로 변경 하거나 PI제어기 출력을 보상하도록 제어기를 구성하는 것이 바람직하다. 본 연구개발의 목적은 파라미터 변화에도 안정한 제어가 가능하도록 제어기를 설계하여 오차와 진동현상을 줄이는데 있다. 제안한 PI/NN제어 기법은 PI제어기와 신경회로망 제어기를 병렬 결합한 구조로 신경회로망 제어기가 PI제어기 출력을 보상하여 파라미터 변화에 강인하도록 설계 하였다. 제어기의 성능평가를 위해 직접 실 공정에 테스트하기가 힘들기 때문에 공정의 특성을 반영하여 모델링한 시뮬레이터를 개발하였고, 시뮬레이션 결과를 실 공정데이터와 비교하여 공정 특성을 모사함을 보였으며, 파라미터 변화에 PI/NN제어기가 오차 및 진동현상을 줄이는 것을 확인 하였다. 또한, 실 공정에서 사용 중인 PI제어기를 주 제어기로 사용하면서 파라미터 변화에 대한 비선형성을 보상하는 제어기 역할을 하기 때문에 신경회로망을 단독으로 사용하였을 때 보다 더 신뢰성 있고 안정적인 제어가 가능하다.

**Abstract** Look into the nuclear power plant of Wolsong currently, it is controlled in order to required operating pressure with PI controller. PI controller has a simple structure and satisfy design requirements to gain setting. However, It is difficult to control without changing the gain from produce changes in parameters such as loss of the valves and the pipes. To solve these problems, the dynamic change of the PI controller gain, or to compensate for the PI controller output is desirable to configure the controller. The aim of this research and development in the parameter variations can be controlled to a stable controller design which is reduced an error and a vibration. Proposed PI/NN control techniques is the PI controller and the neural network controller that combines a parallel and the neural network controller part is compensated output of the controller for changes in the parameters were designed to be robust. To directly evaluate the controller performance can be difficult to test in real processes to reflect the characteristics of the process. Therefore, we develop the simulator model using the real process data and simulation results when compared with the simulated process characteristics that showed changes in the parameters. As a result the PI/NN controller error and was confirmed to reduce vibrations.

**Key Words** : Heavy Water Reactors, Pressure Control, NNC, MATLAB SIMUINK, Power Plant

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20101520100020)과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2011-0027689) 및 호남 광역선도 사업으로 수행한 연구임.

\*교신저자 : Kil-To Chong

Tel: +82-11-675-2004 e-mail: kitchong@jbnu.ac.kr

접수일 11년 11월 11일

수정일 (1차 12년 01월 03일, 2차 12년 03월 02일)

게재확정일 12년 03월 08일

## 1. 서론

원자력 에너지는 친환경적이며, 화석연료의 고갈로 인해 세계적으로 필요한 에너지를 대체할 수 있는 매우 중요한 에너지원이다. 우리나라의 경우 1980년대에는 총 전력 생산량의 절반 정도를 차지했으며, 현재도 국가 총 전력 생산량의 25% 이상의 전력을 생산하고 있다 [1]. 원자력을 이용한 전력 생산은 안전성이 요구되며 공정제어가 필수인 분야이다.

원자력 발전은 냉각재와 감속재에 따라 크게 가압경수로와 가압중수로로 구분 된다. 가압 경수로의 연료로 농축우라늄을 사용하고 냉각재와 감속재는 경수(H<sub>2</sub>O)를 사용하며 발전 정지 후 1/3씩 연료를 교체 하며, 가압 중수로는 천연우라늄을 사용하고 냉각재와 감속재는 중수(D<sub>2</sub>O)를 사용한다[2]. 가압 중수를 사용하는 월성 발전소는 핵연료 교환 시 천연 연료를 탑재할 수 있도록 설계된 매거진 부분과 매거진 앞단에서 시스템 상태에 따라 요구되는 네 가지 모드 설정 압력을 제공하는 중수 공급 시스템으로 분류된다.

본 논문에서 다루고 있는 핵연료 교체 로봇머신의 구동 압력 제어는 중수 공급 시스템에 해당하며 설정 모드에 따라 안전 설정치를 초과하지 않는 범위에서 효율적인 압력을 제공 하도록 한다.

핵연료 교체 로봇은 PI 제어기로 구동되며 제어기 이득은 튜닝을 통해 구한다. PI제어기법은 간단하면서도 비교적 안정한 제어가 가능하여 많은 공정시스템에서 활용되고 있지만 파라미터 변화, 비선형성 및 시간지연이 존재하는 시스템에서는 제어기의 성능이 떨어진다. 이러한 PI제어기의 한계를 보완하는 제어 방법은 다음과 같다. 먼저 시간지연을 알 수 없거나 시변시스템과 차수를 정확히 구할 수 없는 경우에 사용이 가능한 LRPC(Long Range Predictive Control)[3]기법과, 예측 값과 설정치의 차를 최소화 하도록 하는 DMC(Dynamic Matrix Control)[4]기법, 플랜트의 비선형성 및 비 최소위상 특성을 지닌 시스템을 최적화하기 위한 MPC(Model Predictive Control)[5] 방법과 예상치 못한 외란의 변화를 극복하도록 Fuzzy Gain Scheduling을 이용한 Fuzzy PID 제어 방법[6]이 연구되었다.

한편, 불확실한 모델에 대하여 실험을 통해 얻은 입/출력 데이터를 기반으로 제어기를 설계하는 인공지능 제어 방식에 대해서 많은 연구가 진행되었다. 대표적인 예로 신경회로망을 들 수 있으며, S. Lu[7]는 BPNN (Back Propagation Neural Network) 제어방법을 이용하여 복잡한 시스템을 직접 모델링하지 않고 제어성능을 향상시킨 연구를 수행했으며, Serhat Seker[8]는 ERNN(Elman's

Recurrent Neural Network) 제어방법을 이용하여 서로 다른 두 시스템의 물리적 변화를 반영하였고, 시스템의 성능을 향상시켰다. 또한 Yang Oh[9]과 Hyunseob Cho[10]는 PD제어와 신경회로망으로 구성된 하이브리드 제어기를 유도전동기의 속도제어에 적용하여 부하변동에 강인하고 정밀제어가 가능하도록 하였다. 신경회로망은 입력과 출력을 이용하여 모델링이 가능하며 또한 제어기의 설계가 가능하다. 학습을 통해 특성을 파악하므로 파라미터의 변화나 외란이 존재하는 시스템에 적용이 가능하다.

따라서 본 논문에서는 신경회로망의 장점과 기존 제어방식인 PI 제어기를 핵연료 교체로봇의 구동압력 제어에 적용하여 성능 향상을 도모하였다. 간단하면서도 신뢰성이 높은 PI제어기법을 주 제어기로 활용 하므로 선형 부분의 제어를 담당하게 하고, 파라미터 변화 및 외란의 영향을 보상하도록 신경회로망을 병렬 결합 하였다. 그리고 제안한 제어기법의 성능확인을 위해 Matlab 시뮬링크를 이용하여 시스템 모델링을 실시하였다. 시스템 구현은 실공정의 특성을 모사하도록 시스템의 파라미터인 밸브 및 유량과 압력을 수식적으로 구현하였다. 제안한 제어 성능의 검증을 위해 파라미터를 변화 시키며 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안한 시스템이 파라미터 변화와 외란에 대해 기존의 PI 제어기의 단점을 보완함을 확인하였다.

본 논문의 구성은 제어대상인 핵연료 교체 로봇 구동 압력 시스템에 대하여 2장에서 소개하고 있으며, 3장에서는 개발한 시뮬레이터에 대해 다루었다. 4장과 5장에서는 제안한 제어기를 설계하여 시뮬레이션 하였다. 마지막으로 6장에서는 연구에 대한 결론을 기술하였다.

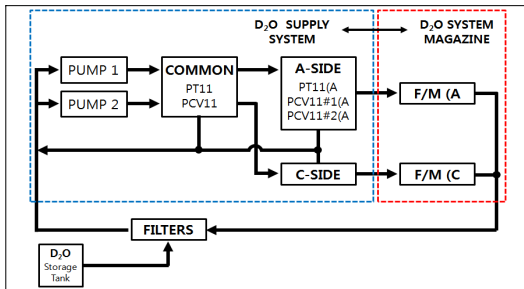
## 2. 핵연료 교체 로봇 구동압력 시스템

핵연료 교체 로봇 구동압력 시스템은, 두개의 펌프와 다섯 개의 제어 밸브로 구성되며, 로봇 머신이 장착된 매거진 앞단의 압력제어를 통해 중수공급 압력을 제어 한다. 이번 장에서는 이 시스템을 공정계통과 제어계통으로 나누고, 각 계통의 세부적인 구성 요소와 역할에 대해 소개하도록 한다.

### 2.1 공정계통

그림 1은 중수로 핵연료 교체로봇 구동압력 시스템을 나타낸 공정계통 블록선도이다. 두 대로 구성된 펌프는 정상상태일 경우 한대의 펌프만 동작한다. 그림에서 COMMON으로 표시된 블록은 공통모관 부분으로 밸브

(PCV11)와 압력 계측기(PT11), 제어기(PC11)로 구성되어 있다.



[그림 1] 중수로 핵연료 교체 시스템 블록선도.  
[Fig. 1] Block Diagram of Heavy Water Reactor F/M System.

핵연료 교환 로봇 머신은, 그림에서 F/M(Fueling Machine)으로 표시된 부분에 장착이 되어있으며, 동일한 메커니즘을 갖는 A측, C측 두 대로 구성되고 운전모드에 따라 각각 독립적으로 동작한다. 운전모드는 공정계통의 급격한 하중 변화로부터 영향을 최소화하고 제어 대상의 압력과 유량을 설정 값으로 안정시키는 기능을 한다. A-SIDE로 표시된 블록은 A측 직렬밸브(PCV11#1(A)와 부하분담밸브 (PCV11#2(A)로 구성되어 있으며, 두 밸브 사이 압력을 계측하는 압력센서 PT11(A와 부하분담 밸브를 제어하는 PC11\_A제어기가 있다. 중수공급 압력 설정 값은 표 1과 같다.

[표 1] 중수공급 압력 설정 값  
[Table 1] D<sub>2</sub>O supply pressure set-point

MODE	설정 값	단위
고압	16.10	MPa(g)
중압	8.48	
저압	3.79	
저-저압	1.50	

중수의 흐름을 살펴보면, 그림 1에 표시된 D<sub>2</sub>O SYSTEM MAGAZINE의 잔여 중수는 필터를 거쳐 펌프로 회귀되며, 마찬가지로 압력제어 밸브의 잔여 중수도 펌프로 회귀된다. 펌프는 유입된 중수를 가압하여 후단에 해당하는 공동모관 압력제어 밸브와 직렬밸브 상단에 공급된다.

## 2.2 제어계통

공동모관밸브 PCV11은 제어기 PC11을 이용하여 제

어되며, 이때 압력계측기 PT11의 신호가 제어입력이 된다. 공동모관 압력제어는 모드 변경 시 과도상태의 첨두 압력을 완화하기 위해 이중화된 설정 값을 적용하여 안전방출밸브의 제한치를 초과 하지 않도록 한다. 따라서 공동모관 제어기 PC11은 설정 값에 따라 공동모관 압력을 일정하게 유지한다.

[표 2] 공동모관 밸브의 이중화 설정치 및 제한치  
[Table 2] The dualization setpoint and the critical value of the common bleed valve

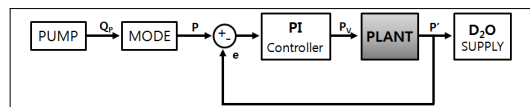
MODE	설정 값	단위
안전 제한치	18.62	MPa(g)
높은 설정치	16.80	
낮은 설정치	15.95	

PC11(A제어기는 A측 F/M 계통으로 공급되는 중수압력을 일정하게 유지하기 위하여 PCV11#1(A와 PCV11#2(A의 두 밸브를 제어한다. PCV11#1(A밸브는 선택된 운전모드별로 개도가 설정되며, 급격히 열리거나 닫힘으로 인하여 시스템이 불안정하게 되는 것을 방지하기위해 slew rate이 적용된다. C측 공급압력 제어는 A측 공급압력 제어와 동일하다.

## 3. 시뮬레이터

핵연료 공정계통은 설계한 제어기를 시스템에 직접 적용하며 실험을 실시하는 것이 불가능하기 때문에 실 공정을 모사할 수 있는 시뮬레이터가 필요하다. 이번 장에서는 공정특성을 모사하도록 수식적으로 모델링한 시뮬레이터를 소개한다.

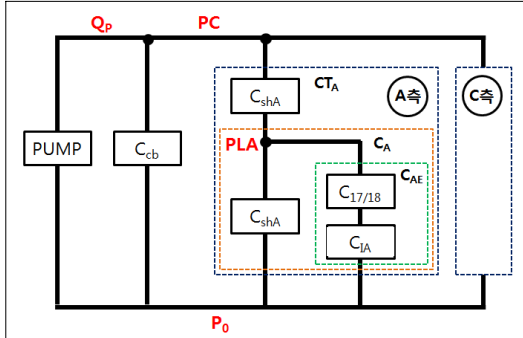
### 3.1 제어 블록선도 구성요소



[그림 2] 제어블록선도  
[Fig. 2] Control Block Diagram

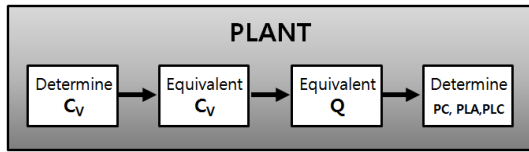
그림 2는 핵연료 교체로봇의 구동압력 시스템을 간략화한 제어블록선도이다. 펌프는 모드와 관계없이 일정한 유량  $Q_p = 72 \text{ GPM}$ 을 유지 하도록 되어있고 시스템 상태에 따라 공동모관의 압력(PC), 중수공급압력(PLA, PLC)의 설정치가 정해진다. 각 설정 값과 PLANT 출력의

차가 제어기의 입력으로 사용된다. 세 대의 독립적으로 작동하는 PI제어기는 에러를 줄이는 방향으로 다섯 개의 제어 밸브에 밸브개도( $P_V$ )값을 제공한다. 또한 PLANT 블록에서는  $P_V$  값과 시스템 동특성을 이용하여 유량상수 ( $C_V$ ), 유량( $Q$ ), PC, PLA, PLC를 계산한다. 그림 3은 그림 2의 PLANT에서 필요한 유량상수를 중심으로 보다 자세히 표현한 그림이다.



[그림 3] 중수공급계통 블록선도  
[Fig. 3] Block Diagram of D<sub>2</sub>O supply system

3.2 PLANT 모델링



[그림 4] PLANT 내부 블록선도  
[Fig. 4] PLANT Internal Block Diagram

그림 4는 PLANT 내부 블록선도로 그림 2의 PI제어기의 출력인 밸브개도  $P_V$ 를 이용하여 각 밸브의 유량계수  $C_V$ 를 결정한다. 계속해서 등가 밸브계수를 결정하며, 이를 이용하여 등가 유량  $Q$ 를 구한다. 이제 등가유량  $Q$ 를 이용하여 공통모관압력(PC)과 중수공급압력(PLA, PLC)을 구한다. 그리고 밸브계수는 밸브개도율의 비선형 함수로 표현되는 특성곡선을 이용하여 구한다. 밸브계수는 파이프에 흐르는 유량을 결정하고, 이 유량은 중수공급에 필요한 압력의 크기를 결정한다. 따라서 밸브계수와 연결된 각 밸브사이의 관계는 정확한 시뮬레이터 개발에 매우 중요한 요소이다.

밸브개도( $P_V$ )와 밸브계수( $C_V$ )의 관계는 제조사가 제공하는 자료를 이용하여 구할 수 있으며, 밸브상수는 유량  $Q$ 와 밸브 양단 간 압력차  $\Delta P$ 의 함수로 다음과 같이

표현 된다.

$$C_V = f(Q, \Delta P) = \frac{Q}{\sqrt{\Delta P/G}} \tag{1}$$

여기서  $G$ 는 비중량을 나타내며 온도에 따라 차이가 있으나[11] 정상 상태 운전 조건하의 중수비중인 1.1[g/ml]을 이용 하였다. 식 (1)로 부터  $Q$ 와  $\Delta P$ 를 구하면 다음과 같다.

$$Q = C_V \times \sqrt{\Delta P/G} \tag{2}$$

$$\Delta P = G \frac{Q^2}{(C_V)^2} \tag{3}$$

식 (2)와 (3)에 필요한 중수공급계통의 밸브계수를 정리하면 다음과 같다.

먼저  $C_{AE}$ 를 살펴보면, A축 부하에 해당하는 중수계통( $C_{17/18A}$ )과 핵연료 교환기( $C_{LA}$ ) 사이의 등가밸브 상수이며 식 (4)와 같이 표현된다.

$$C_{AE} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{C_{17/18A}^2} + \frac{1}{C_{LA}^2}}} \tag{4}$$

$C_A$ 는  $C_{AE}$ 와 부하분담 밸브( $C_{shA}$ ) 사이의 등가밸브 상수이며 다음과 같다.

$$C_A = C_{AE} + C_{shA} \tag{5}$$

그러므로  $CT_A$ 는 중수공급계통의 A축 등가밸브 상수로 식6과 같이 표현된다.

$$CT_A = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{C_A^2} + \frac{1}{C_{srA}^2}}} \tag{6}$$

C축의 중수공급계통 등가밸브 상수는 구하는 방법은 A축의 계산 방법과 동일하다.

$CT$ 는 중수공급계통 전체 등가상수로 다음과 같다.

$$CT = C_{cb} + CT_A + CT_C \tag{7}$$

여기서,  $C_{cb}$ 는 공통모관 밸브상수를 나타낸다. 다음으로 식 2를 이용하여 직렬밸브에 흐르는 유량( $Q_{srA}$ )을 구하면 식 (8)과 같이 표현된다.

$$Q_{srA} = C_{srA} \sqrt{PC - PLA} \tag{8}$$

식 (8)을 이용하여 공통모관 밸브의 유량을 구하면 다음과 같다.

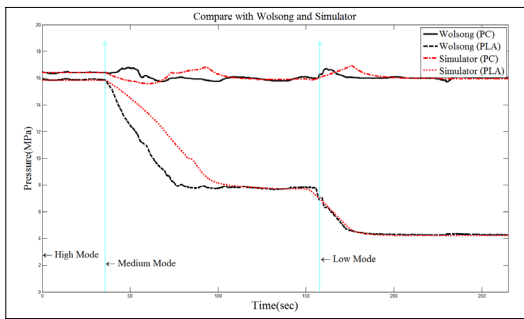
$$Q_{cb} = Q_P - Q_{srA} - Q_{srC} \tag{9}$$

여기서,  $Q_P$ 는 펌프의 바로 후단이며 공통모관 제어밸브와 직렬압력제어 밸브 상단을 흐르는 유량이며, 앞서 구한 밸브계수와 유량을 식 (3)에 대입하면 공통모관 압력과 A축 중수공급압력을 구할 수 있다.

$$PC = G \cdot \left(\frac{Q_P}{CT}\right)^2, \quad PLA = G \cdot \left(\frac{Q_{srA}}{C_A}\right)^2 \quad (10)$$

### 3.3 시뮬레이터 모사 실험

월성 원자력 발전소의 실 공정 데이터가 생성된 동일한 조건으로 시뮬레이터 모사실험을 실시하였다. 샘플링 시간은 0.05초이며, 고압-중압-저압으로 모드가 변할 때 공통모관밸브 압력(PC)와 A측 중수공급압력(PLA)에 대해 PI제어기만 적용하여 시뮬레이션 하였으며, 결과는 그림 5와 같다.



[그림 5] 월성 원자력 발전소의 데이터와 시뮬레이터의 응답  
[Fig. 5] The Response of Wolsong and Simulator

그림 5에서 실선은 월성 원자력 발전소의 PC와 PLA를 나타내며, 점선은 시뮬레이션을 통해 얻은 PC와 PLA이다. PC는 설정 제한치를 초과하지 않은 범위에서 작동하며, PLA도 정상상태 값이 월성 원자력 발전소의 출력을 모사함을 확인할 수 있다.

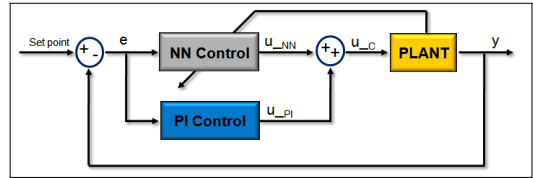
다음 장에서는 앞에서 모델링한 PLANT를 이용하여 핵연료 교체 로봇의 성능 향상을 위한 제어기를 설계한다.

## 4. 제어기 설계

### 4.1 PI제어기와 신경회로망의 병렬제어기

월성 원자력 발전소에서는 고주파 외란이 공정 변수에 포함되는 경우 공정계통의 불안정을 유발하는 미분제어항을 제외한 PI 제어기를 사용하고 있다. 하지만 핵연료 교체로봇의 압력제어는 비선형성과 시간지연의 특징을 갖기 때문에 시스템의 파라미터 변화에 능동적으로 대응하기 위해 PI제어기를 보상하는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 신경회로망을 병렬 결합해 기존의 PI제어기 출력을 보상하도록 설계하여 파라미터 변화에 따른 오차를 작게 하고, 특히 중수공급 압력 모드 변화 시 발생하는

과도한 진동현상을 줄이도록 제어기를 설계하였다.



[그림 6] PI/NN 제어기 구조  
[Fig. 6] PI/NN Controller Structure

그림 6은 신경회로망 제어기와 PI 제어기가 병렬로 연결된 PI/NN 제어기 구조를 나타낸다. PI 제어기는 모드에 따른 설정 값과 플랜트 출력의 차이를 에러로 정의하고 이 에러를 줄이는 제어입력  $u_{PI}$ 을 산출한다. 공통모관 제어기와 중수공급압력 제어기에 사용된 PI제어 이득은 월성 원자력 공정에서 사용하는 이득값을 사용하였으며, 각 이득값은 아래와 같다.

$$K_P = 0.8333, \quad K_I = 0.2222 \quad (11)$$

신경회로망 제어기는 시스템에 영향을 주는 에러, 설정압력, 플랜트출력 및 PI제어 값을 신경회로망의 입력으로 설정하고, 출력은 신경회로망 입력인  $u_{NN}$ 으로 설정한다. 플랜트에 작용하는 최종 제어입력은 두 제어기 입력의 합으로  $u_C = u_{PI} + u_{NN}$ 이다.

### 4.2 신경회로망 제어기 설계

본 연구에서 적용한 신경회로망의 구조는 널리 사용되고 있는 전향경로 신경회로망[12]를 사용하였다. 신경회로망 구조는 입력, 은닉, 출력의 3개 층으로 구성되어 있으며, 입력 층은 바이어스를 포함한 8개의 학습입력을 사용하고, 은닉 층은 24개의 유닛으로 구성되어 있으며, 출력 층은 A측 중수공급압력 보상을 위해 하나의 신경회로망 출력을 갖는다. 신경회로망 오차함수는 식 (12)와 같다.

$$E = \frac{1}{2} (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (12)$$

여기서  $y_k$ 는 요구되는 설정치 출력이며,  $\hat{y}_k$ 는 플랜트 출력을 나타낸다. 은닉 층 출력과 출력 층 출력은 다음과 같이 정의된다.

$$y_j \leftarrow f(V_j^t Z), \quad j=1, 2, \dots, J \quad (13)$$

식(13)은 은닉 층 출력이며, 여기서  $V$ 는 은닉 층 가중치,  $Z$ 는 신경회로망 입력을 나타내며 활성화 함수로 양

극성 Sigmoid를 사용 하였다.

식 (14)는 출력 층의 출력으로 활성화 함수로 선형함수를 사용하였다.

$$o_k \leftarrow f(W_k^t y), k = 1, 2, \dots, K \quad (14)$$

역전파 알고리즘에 사용된 출력 층 에러신호는  $\delta_{ok}$ 로 식 (15)와 같이 성능지수와 신경회로망 출력 부분을 포함하며, 은닉 층 에러신호  $\delta_{yj}$ 는 식 (16)과 같이 신경회로망의 출력과 출력 층의 에러신호, 은닉 층과 출력 층 사이의 가중치로 정의된다.

$$\delta_{ok} = \frac{1}{2}(y_k - \hat{y}_k)(1 - o_k^2) \quad (15)$$

$$\delta_{yj} = \frac{1}{2}(1 - o_k^2) \delta_{ok} W_{kj} \quad (16)$$

다음으로 역전파 알고리즘을 통해 각 가중치는 식 (17)과 식 (18)을 이용하여 수정된다.

$$W_{kj} \leftarrow W_{kj} + \eta \delta_{ok} Y_j \quad (17)$$

$$V_{ji} \leftarrow V_{ji} + \eta \delta_{yj} Z_i \quad (18)$$

## 5. 시뮬레이션

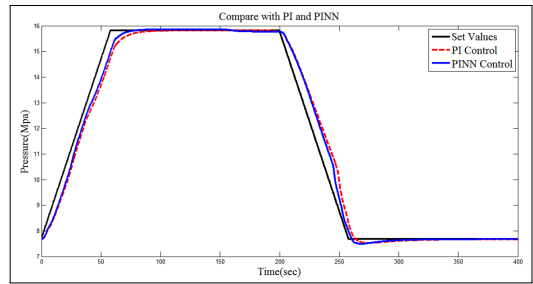
본 논문에서 제안한 제어알고리즘의 성능확인을 위해 핵연료 교체 로봇을 모델링한 시뮬레이터를 이용 하였다. 해당공정에서 연료교환기의 작업환경 변화와 운전모드 전환 시 유발되는 공정계통의 과도현상을 줄이고 안전 설정치 범위 안에서 효율적인 압력을 제공하는 것이 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 작업환경 변화 즉 공정 파라미터의 변화에 따른 분석을 위하여 부하분담 밸브특성곡선에 변화를 주는 시뮬레이션을 실시하였고, 운전모드 전환으로는 공정이 고압에서 중압으로 변경되는 시나리오를 적용하였다.

### 5.1 PI/NN 검증

이번 절에서는 외란과 파라미터 변화가 없는 경우에 대하여 PI/NN제어기가 적절히 작동하는지에 대한 성능평가를 위해 시뮬레이션 하였다.

공통모판 밸브는 압력이 고압모드에서 중압모드로 변경 시 이중화 모드를 반영하고 있으며 이를 통해 안전방출밸브의 제한치를 초과하지 않음을 확인 하였다.



[그림 7] 중수공급 압력(PLA) 출력  
[Fig. 7] D<sub>2</sub>O Supply Pressure(PLA) Response

그림 7은 신경회로망의 초기 가중치를 off-line에서 학습된 가중치를 이용하여 실시간 플랜트에 적용 한 경우이다. 검은색 실선은 설정 값 이며, 파란색 실선은 PI/NN 제어기를 적용한 경우이고, 점선은 PI제어기를 적용한 결과이다. RMSE값을 비교하면 표 3과 같다.

[표 3] 파라미터 변화가 없을 때 두 제어기의 성능 비교  
[Table 3] Performance of controllers when parameters are not changed.

	PI	PI/NN	Unit
RMSE	0.5006	0.4025	MPa(g)
Setting Time	60.0	58.2	sec
Rise Time	49.6	48.2	sec
Delay Time	33.5	32.1	sec

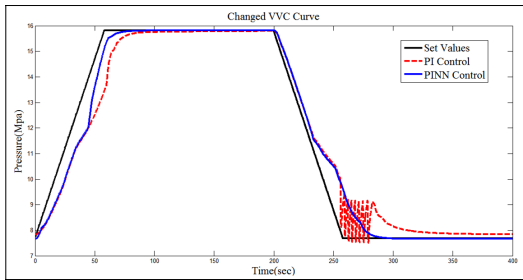
표 3과 같이 PI/NN제어기 적용 시 RMSE값이 0.0981만큼 개선되었고, 모드 변경 시 빠르고 정확하게 설정치를 따라가는 것을 확인 하였다.

### 5.2 파라미터 변경

이번 절에서는 제안한 제어알고리즘이 시스템의 파라미터가 변하는 경우에도 공정의 불확실성을 적절하게 수용하는지 검증하기 위하여 0%에서 100%개도로 표현된 부하분담 밸브의 특성곡선을 5%에서 60% 구간을 변경하여 시뮬레이션 하였다.

그림 8은 부하분담 밸브의 특성곡선 변경 시 중수공급 압력 파형으로 고압에서 중압으로 모드가 변경되는 부분에서 PI제어기만 적용 하였을 때 진동이 발생함을 알 수 있다. 반면 PI/NN제어기를 적용하였을 때 진동이 줄어들고 빠르게 설정 값에 도달함을 확인 할 수 있다.





[그림 8] 부하분담밸브의 특성 변경의 결과  
 [Fig. 8] Response of System when Characteristic of Shunt Valve is Changed

특성곡선 변경 시 두 제어기의 성능은 표 4에 정리하였다.

[표 4] 특성곡선 변경 시 두 제어기의 성능 비교  
 [Table 4] Comparison of performance of two controller when the characteristic of shunt valve is changed

	PI	PI/NN	Unit
RMSE	0.78690	0.6550	MPa(g)
Setting Time	65.3	57.5	sec
Rise Time	56.4	51.8	sec
Delay Time	41.5	40.9	sec

## 6. 결론

본 연구를 통하여 증수로 핵연료 교체 로봇의 구동압력 제어를 위한 시뮬레이터를 개발하였으며, 파라미터 변화를 해결하는 PI/NN 제어기를 개발하였다. 시뮬레이터 개발을 위해 제어시스템의 공정계통과 제어계통을 분석하였으며 공정 동특성을 반영한 시뮬레이터 개발에 응용하였다. 실 공정데이터와 시뮬레이터 결과를 확인한 결과 시뮬레이터가 공정특성을 모사함을 확인 하였다.

제안한 PI/NN제어 기법은 PI제어기와 신경회로망 제어기를 병렬 결합한 구조로 신경회로망 제어기가 PI제어기 출력을 보상하여 파라미터 변화에 강인하도록 설계 하였다. 제어 성능을 위해 부하분담 밸브의 특성곡선을 변화시켜 시뮬레이션 한 결과 PI제어기는 모드변경 시 진동이 발생하는 반면 PI/NN제어기 적용 시 진동을 줄이면서 설정치를 따라감을 확인하였다. 또한 공정계통에서 매우 중요한 요소인 공통모관 압력이 안전 설정치 범위를 초과하지 않고 효율적인 범위에서 작동함을 확인 하였다.

## References

- [1] Suyeong Ha, "Domestic Nuclear Power Plant Operating Status", Journal of mechanical engineers, Vol. 48, No. 4, pp. 44-48, 2008.
- [2] KOREA HYDRO & NUCLEAR POWER CO.,LTD, "Domestic Nuclear Status", 2011.
- [3] G. PRASAD, E. SWIDENBANK, and B. W. Hogg, "A Local Model Networks Based Multivariable Long-Range Predictive Control Strategy for Thermal Power Plants", Elsevier Science, Vol. 34, No. 10, pp. 1185-1204, 1998.
- [4] J. A. Rovnak, Dr. R. Corlis, "DYNAMIC MATRIX BASED CONTROL OF FOSSIL POWER PLANTS", IEEE, Vol. 6, No. 2, 1991.
- [5] KiYong Oh, Hoyol Kim, "Unit Response Optiizer mode Design of Ultra Super Critical Coal-Fired Power Plant based on Fuzzy logic & Model Predictive Controller", KIEE. Vol. 57, No. 12, pp. 2285-2290, 2008.
- [6] Wee-Jae Shin, "Fuzzy Scheduling for the PID Gain Tuning", KIIS, Vol.15, No.1, pp. 120-125, 2005.
- [7] S. Lu, B.W.Hogg, "Dynamic nonlinear modelling of power plant by physical principles and neural networks", Electrical Power and Energy System, No. 22, pp. 67-78, 2000.
- [8] Serhat Seker, "Elman's recurrent neural network applications to condition monitoring in nuclear power plant and rotating machinery", EAAI, pp. 647-656, 2003.
- [9] Yang Oh, "The Speed Control of Induction Motor using PD Controller and Neural Networks", IEEK, Vol. 39, No. 2, pp. 73-81, 2002.
- [10] Hyunseob Cho, "Study on the Speed Control of Induction Motor using a PID Controller and Neural Network Controller", KAIS, Vol. 10, No. 8, pp. 1993-1997, 2009.
- [11] Lide, D.R. "Handbook of Chemistry and Physics, 73rd Edition", CRC, Boca Raton, 1992, Chapter 6, pp. 13.
- [12] Jacek M. Zirada. "Artificial Neural Systems", pp. 185-206.

**임 대 영(Dae-Yeong, Lim)**

[준회원]



- 2010년 2월 : 전북대학교 전자공학 (공학사)
- 2011년 8월 : 전북대학교 전자공학 석사수료
- 2011년 9월 ~ 현재 : 전북대학교 전자공학 논문 연구생

<관심분야>

자동제어, 인공지능, 공정제어, 조선 IT

**김 영 철(Young-Chul Kim)**

[정회원]



- 1993년 2월 : 전북대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1998년 4월 : Tohoku univ. 대학원 기계전자과 (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 2004년 12월 : 대 불대학교 전기전자공학부 조교수
- 2005년 4월 ~ 현재 : 군산대학교 기계자동차공학부 부교수

<관심분야>

기계전자, 조선IT, 로봇응용, 유한요소해석

**이 창 구(Chang-Goo Lee)**

[정회원]



- 1981년 2월 : 전북대학교 전기공학과 졸업
- 1983년 2월 ~ 1991년 1월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 1991년 2월 : 전북대학교 전기공학과 박사
- 1992년 2월 ~ 현재 : 전북대학교 전자공학부 교수

<관심분야>

퍼지제어, 공정제어, 메카트로닉스

**정 길 도(Kil-To Chong)**

[정회원]



- 1984년 2월 : Oregon State University 기계공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : Georgia Institute of Technology 기계공학 석사졸업
- 1992년 2월 : Texas A&M University 기계공학(공학박사)
- 0000년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 전자공학부 교수

<관심분야>

Marine Navigation, Time-Delay, Robotics, 인공지능

**김 영 백(Young-Baik Kim)**

[정회원]



- 1982년 2월 : 전북대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2009년 9월 ~ 현재 : 전북대학교 대학원 박사과정
- 1982년 1월 ~ 1983년 4월 : ADD 연구원
- 1983년 4월 ~ 1990년 7월 : 삼성항공(주) 연구소 선임연구원
- 1990년 9월 ~ 1996년 12월 : 한국원자력연구소 선임연구원
- 1997년 1월 ~ 현재 : 한국전력기술(주) 신울진1,2/신울진3,4 원자로설계사업책임자(상무)

<관심분야>

계측제어, 원자력발전 계측제어