

# 신경망 투우닝에 의한 유량계통 동력 제어용 다변수 2-자유도 PID의 제어기 설계

(Design of Multivariable 2-DOF PID for Electrical Power of Flow System  
by Neural Network Tuning Method)

김동화\*  
(Dong-Hwa Kim)

## 요약

발전소나 화학플랜트의 급수 및 순환수 계통은 물론 건물의 공조설비 유체계통, 정수 또는 폐수설비에서의 원수유량 및 약품 주입제어 등과 같은 유체계통은 대부분 밸브와 동력 펌프를 이용해 유량 제어를 한다.

따라서 이들 유체계통의 제어방법 및 정밀도에 따라 그 시스템의 성능 및 에너지 절약에 많은 영향을 미치게 된다. 지금까지 이들 계통은 주로 PI제어기를 이용하였으나 이 제어 방법으로는 루프간의 간섭현상으로 정밀하게 유량부하를 제어 할수 없는 문제점이 있다.

본 논문에서는 유체계통 동력부하 설비를 다변수로 구성하여 2-자유도 PID제어를 적용하고 신경망을 이용해 투우닝함으로서 효과적으로 정밀하게 제어 할수 있는 방법을 제시하고 시뮬레이션을 통해 그 방법의 우수성을 입증하였다. 시뮬레이션 결과 설정치를 잘 추종하고 외란에 대해서는 강인성을 갖는 것으로 나타났다.

## Abstract

The fluid system such as, the quantity control of raw water, chemicals control in the purification, the waste water system as well as in the feed water or circulation system of the power plant and the ventilation system is controlled with the valve and motor pump.

The system's performance and the energy saving of the fluid systems depend on control of method and delicacy.

Until, PI controller use in these system but it cannot control delicately because of the coupling in the system loop.

In this paper we configure a single flow system to the multivariable system and suggest the application of 2-DOF PID controller and the tuning methods by the neural network to the electrical power of the

\*정회원 : 대전산업대학교 제어계측공학과 교수

접수일자 : 1997. 9. 29

flow control system. the 2-DOF controller follows to a setpoint has a robustness against the disturbance in the results of simulation.

Keywords Title, Intelligent control, Neuro control, Flow control, 2-DOF control.

## 1. 서 론

유체 공급용 동력 설비는 화력 발전소나, 화학플랜트의 급수 및 순환수 계통은 물론 건물의 냉난방, 기타 우리 주위의 산업설비 계통에도 광범위하게 이용되는 부하설비로 이들 플랜트 전력 소비량의 대부분을 차지한다.

그러나 이들 유체는 관로에서의 여러 가지 현상과 유체적 동특성 때문에 계측 및 제어시는 고려하여야 할 많은 인자가 있어 많은 전력을 소비하는 것에 비해 정밀 제어는 되지 않는 문제점이 있다.

특히 정수 또는 폐수설비에서의 원수유량 및 약품 주입제어, pH제어 등과 같은 경우는 유량제어의 정밀도에 따라 약품의 주입량이 다르게 되고 그 결과는 수질에도 영향을 미칠 수 있어 원수 수질 및 유량, 약품 주입량, 날씨조건 등에 따라 전동력 제어를 다르게 하여야 함에도 불구하고 항상 일정한 제어를 함으로서 많은 에너지를 소비하게 된다[4~5].

한편 화력 또는 원자력 발전소와 같은 전력 설비의 전체 제어계통은 동력 펌프와 같은 많은 동력제어 루프(minor loop)로 구성되어 있는게 보통이다. 따라서 이들 소 그룹의 동력용 부하 설비를 효과적으로 제어함으로서 전체 시스템을 효과적으로 제어 할 수 있고 전력 소비를 줄일 수 있다.

이들 유량부하 제어계통의 특징은 유체의 밀도, 점도, 관로의 모양, 굵기 등 유체특성과 규모에 따라 층류, 난류, 레이놀즈 수(Reynolds Number)가 다르므로 제어시는 그 특성을 고려하여야 한다[6].

따라서 효과적으로 이들 유체 부하 계통을 제어하기 위해서는 유속분포, 평균유속, 유체의 점성, 관로의 모양에 따라 유체의 특성과 시스템의 규모를 반영하여 제어 할 수 있는 제어 방법이 필요하다.

그러나 유량 부하 제어계통의 경우 지금까지는 주로 단일 루프로 구성하여 PI제어기를 이용 하는게 대부분이다. 따라서 이 제어 방법으로는 루프간의

간섭현상으로 전체적인 효율을 고려하여 정밀하게 유량부하를 제어 할 수 있는 제어기 설계가 어렵다.

이러한 문제점에 입각하여 본 연구에서는 많은 플랜트나 전력설비는 물론 정수처리의 약품 주입제어에 이용 될 수 있는 정밀 유량부하 제어 방법을 다변수로 구성하고 2자유도 PID제어기(2-DOF PID)를 이용해 제어하는 문제를 고찰하였다. 이 때 적용한 2-자유도 PID제어기의 특성은 신경망을 이용하고 2-자유도 PID제어기의 성능을 고찰하기 위해 기존의 PI제어기만을 이용해 제어한 경우와 비교 고찰하였다.

## 2. 유량제어 시스템

### 2.1 유량제어 시스템의 특성

유량제어 계통의 구성요소는 배관, 압력원(펌프, 탱크), 밸브 등으로 이들 구성요소의 특성에 의해 유량제어 시스템의 정밀도가 결정된다.

따라서 유체관 길이 L, 유량 q, 점도  $\eta$ , 유체관 상하류 압력  $p_1$ ,  $p_2$ , 유체관로 저항 R이라 하면 이들의 관계를 나타내는 Hagen-Poisuilli식  $p_1 - p_2 = \frac{128\eta L}{\pi d^4}$

$q, R = \frac{128\eta L}{\pi d^4}$  를 이용해 압력을 조절 할 필요가 있다.

한편 유체가 순수한 물이 아닌 기체나 기타 유체인 경우는 밀도에 따라 그 유량이 변하므로 밀도를 고려하여야 한다. 또 점도와 유량과의 관계는 动粘度  $\zeta$ , 밀도  $p$ 와의 관계  $\eta = p\zeta$ 에 의해 결정되므로 적당한 점도를 계산하여 유량 제어시 고려 할 필요가 있다.

뿐만 아니라 점도는 온도와 밀접한 관계가 있어 일반적인 액체의 경우는  $\eta A e^{B/(T-C)}$ , ( $A, B, C$ )로 주어지므로 온도도 고려하여야 한다. ( $A, B, C =$  유체에 의해 결정되는 상수)

본 연구에서 사용한 유체는 물이므로 이들 파라메

터의 변화에 대한 것은 고려하지 않는다.

## 2.2 기존의 유량제어 투프 구성방법

기존의 유량 제어 투프는 밸브 및 펌프를 이용하는 것이 일반적인데 정밀한 유량 제어 계통에 그대로 이용하는 경우는 압력 원(Pressure source)의 압력이 일정치 않아 정밀한 제어가 어렵다.

압력 원으로서 탱크를 이용하는 경우는 탱크의 액 위 변화에 따라 압력이 변할 수 있고 펌프를 사용하는 경우는 펌프에 의해 필요한 압력을 유지 할 수 있으나 온도, 밀도, 점도 변화에 따른 특성을 유량제어에 반영 하기가 어렵다.

뿐만 아니라 이들 각 유량 제어의 특성은 밸브의 특성에 의해 유량이 변하고 또 배관길이 및 압력 원의 상태에 따라서도 운전점이 변하게 됨으로 정밀 제어로서의 투프는 적당치 않다.

유량제어에 가장 영향을 크게 미치는 장치로는 밸브, 가변속 전동기 등과 같은 유량을 제어하는 조작단의 특성으로 이들의 대부분은 비선형 특성이므로 조작단의 특성에 맞는 보정 장치를 구비하여야 한다. 따라서 전제적인 시스템의 효율을 고려한 제어가 어렵게 되어 있다.

한편 유체계통은 온도, 압력, 밀도 등에 따라 유량에 차이가 있어 정밀 유량 제어시는 이들을 보상해주어야 한다.

유량제어의 주요 외란인 1차 압력 P1의 변동이 매우 큰 경우에는 그림 2.1과 같이 압력제어 투프를 부가한 형태로 유량제어 투프를 구성하나 이 경우 압력 및 유량이 서로 간섭이 일어나므로 효과적으로 유량제어를 하는게 어렵게 된다.

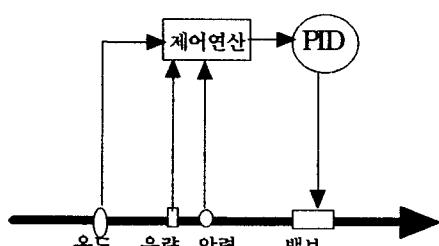


그림 2.1 유량 제어시의 온도, 압력보정

Fig. 2.1 The compensation of temperature and pressure in flow control

스큐류 펌프 등을 이용해 일정한 유량을 내보내는 경우 이들 펌프는 토출측을 닫으면 구동 전동기가 파손하므로 리턴 투프가 필요할 뿐만 아니라 펌프 토출압의 맥동이나 유체의 특성에 의해 유량 계통의 외란이 다르고 변동주기도 다르다.

유량 제어계통의 응답특성은 밸브크기 및 특성, 전송기 이득은 물론, 유체의 선형성 등에 의해 결정되고 응답특성이 빠르다. 따라서 미분 동작은 잡음을 증폭시키는 효과가 있어 유량제어의 모드는 적분 제어기를 사용하게 된다.

이 경우 쉽게 투닝도 가능하고 잡음을 대해 강한 점 등이 있으나 PI 제어기에 비해 3~4배의 느린 응답을 갖는 결점이 있어 보통 PI 제어기를 많이 사용한다. 따라서 전체적으로는 제어계통에 대한 정보 취득에 한계가 있고 정유량 제어가 어렵게 된다.

## 3. 2-자유도 PID 제어기■ 이용한 유량 제어 투프 구성

### 3.1 유량제어 투프 구성

유량 제어계통에서는 앞서 설명한 유체의 밀도, 온도등은 물론 입력단의 압력변화에 따라 간섭현상이 발생하여 정유량 제어가 어렵게 된다. 특히 실제의 프로세스에서 입력단은 정 압력으로만 구성되어 있지 않고 프로세스의 특성에 따라 변하는 경우가 많으므로 정밀 제어시는 이들의 입력단 특성을 고려하여야 한다.

한편 유속변화에 따른 유량계에 전달된 신호의 압력은 압력이 변하기 전의 유속을 측정하게 됨으로 유량변화가 심하거나 관경이 큰 경우는 정밀 제어하는게 더욱 어렵게 된다.

본 연구에서는 종래의 유량제어 계통인 그림 3.1을 그림 3.3과 같이 다변수 계통으로 구성하고 유량 변화에 따른 압력변화 현상을 반영하도록 한다. 이와 같이 시스템을 구성하면 유량 제어시 밸브의 동작에 따라 앞단의 압력이 변하는 특성을 반영 할 수 있어 정밀 유량제어가 가능하다. 그림 3.2는 그림 3.1의 다변수 계통에 대한 각 제어소자들을 전달함수

를 이용해 기술한 것으로 제어기 설계시 필요한 특성을 반영 할 수 있다.

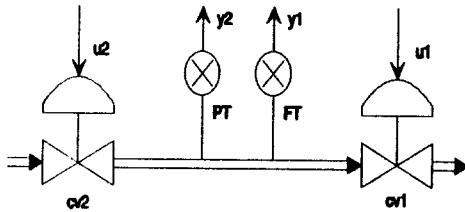


그림 3.1 압력제어 루프를 이용한 종래의 정유량(定流量) 제어 시스템

Fig. 3.1 The conventional constant flow control system with pressure control loop

### 3.2 정유량 제어를 위한 2자유도 제어기 구성

기존의 유량제어에서는 압력원으로서 펌프를 사용하는 경우 밸브의 조작에 관계없이 항상 일정속도로 조작함으로서 압력원이 변하는 특성을 갖는다. 따라서 정밀한 유량제어가 어렵다.

본 연구에서는 종래의 유량제어 계통을 그림 3.3과 같은 다변수 유량제어계통으로 구성하고 제어기는 그림 3.4의 신경망 2-자유도 PID제어기를 이용하였다.

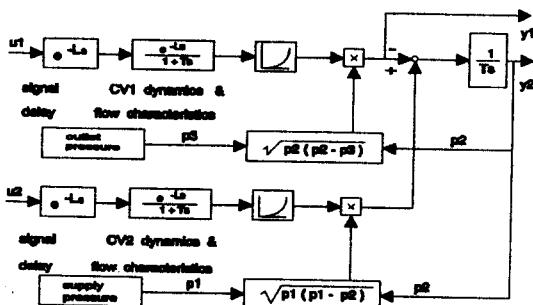


그림 3.2 정유량 제어 시스템의 비선형 블록선도  
Fig. 3.2 Nonlinear Block diagram of the constant flow control system

그림 3.3의 방법은 밸브 조작에 따라 밸브 앞단 압력이 변하는 것을 측정하여 2-자유도 제어기의 튜우닝 파라메터로 이용함으로서 일정 유량을 제어 할 수 있다. 이 때 제어기의 튜우닝 파라메터 입력으로 사용하는 것은 펌프 속도외에 압력, 유량등으로 이들 값들을 종합적으로 연산하여 튜우닝 한다.

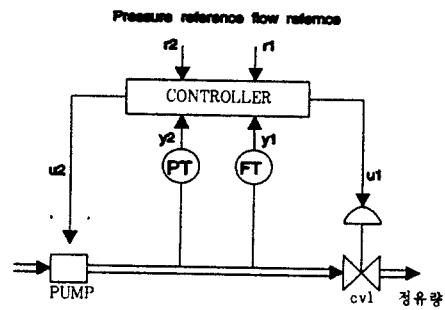
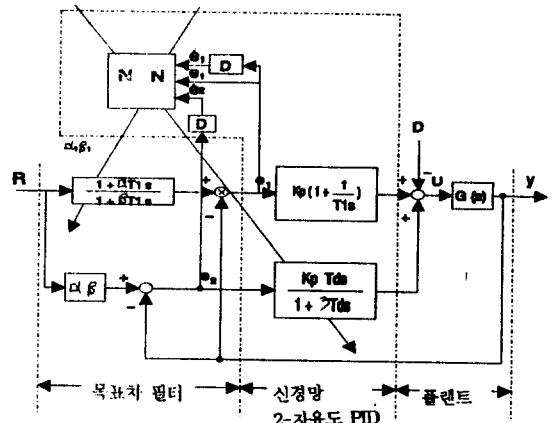
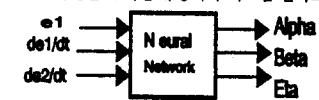


그림 3.3 다변수 정유량 제어계통 시스템 구성도

Fig. 3.3 The system configuration of the multivariable constant flow control system



a) 신경망을 구비한 유량제어 시스템 블록도



b) 신경망의 입력 변수

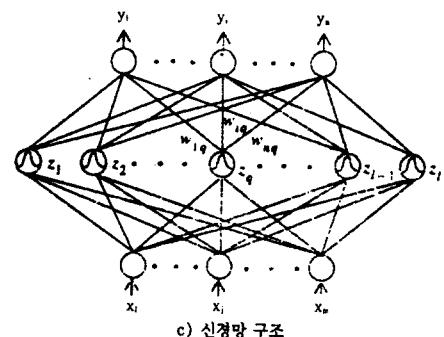


그림 3.4 신경망 튜우닝에 의한 유량제어동력 제어용 다변수 2-자유도 PID제어기

Fig. 3.4 Design of multivariable 2-DOF PID for electrical power of flow system by neural network tuning method

### 3.3 2-자유도 PID제어기의 투우닝

그림 3.4는 신경망을 이용해 2-자유도 제어기를 투우닝하는 방법으로 신경망의 구조는 그림 3.4와 같다. 그림 a)에서 플랜트 전달함수를  $G(s)$ , 조작량을  $PV(s)$ , 설정치를  $SV(s)$ 라 하면 조작량은 다음식으로 주어진다.

설정치에 대해 :

$$G_{PV}(s) = \frac{G_1}{G_2}$$

$$G_1 = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_s} + \frac{\gamma T_s s}{1 + \eta T_s s} \right) G(s) SV(s)$$

$$G_2(s) = 1 + K_p \left[ \alpha + \left( \frac{1}{T_s} - \frac{(\alpha-1)(1-\beta)}{1 + \beta T_s} \right) + \frac{\gamma T_s s G(s)}{1 + \eta T_s s} \right] \quad (3.1)$$

외란에 대해 :

$$G_{DV}(s) = \frac{G_3(s)}{G_4(s)}$$

$$G_3(s) = G(s) D(s)$$

$$G_4(s) = 1 + K_p \left[ \alpha + \left( \frac{1}{T_s} - \frac{(\alpha-1)(1-\beta)}{1 + \beta T_s} \right) + \frac{\gamma T_s s G(s)}{1 + \eta T_s s} \right] \quad (3.2)$$

$$PV(s) = G_{PV}(s) + G_{DV}(s)$$

여기서 분모를 변형시키면

$$\text{분모} = K_p \left[ 1 + (\alpha-1)\beta \left( 1 + \frac{1}{1 + (\alpha-1)\beta T_s} \right) + \frac{1}{1 + (\alpha-1)\beta} \left[ \frac{T_s s}{1 + \eta T_s s} + \frac{(\alpha-1)(1-\beta)\beta T_s}{(1 + \beta T_s)} \right] \right]$$

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

$$K_p = K_p / 1 + (\alpha-1)\beta$$

$$K_i = K_i / 1 + (\alpha-1)\beta$$

$$K_a = K_a / 1 + (\alpha-1)\beta \quad (3.3)$$

이 관계를 이용하여 오차신호  $e_1, e_2$ 를 신경망에 도입하여 즉, 제어기 입력에 들어가는 오차를 검출하여 오차가 가장 적도록  $\alpha, \beta, \eta$ 값을 조절하면 식(3.3)에 의해  $K_p, K_i, K_a$ 가 투우닝된다. 신경망 학습에

사용한 것은 역전파 알고리즘을 사용하였다.

### 4. 시뮬레이션 및 결과고찰

그림 4.1은 유량제어 계통에 기존의 PI제어기를 적용하고 유량 설정치를 계단식으로 변화 시켰을 때의 유량변화 특성이고 그림 4.2는 같은 제어계통에 2-자유도 PID제어기를 적용하고 신경망을 이용해 투우닝한 경우의 출력 특성이다.

이들 두 그림에서 볼수 있는 바와 같이 기존의 PI 제어기의 경우는 초기의 오버슈트가 크게 나타나는데 반해 2-자유도 PID 제어기를 적용한 경우는 오버슈트가 적게 나타나고 있다. 그림 4.3은 이 때의 2자유도 제어기의 출력신호이다.

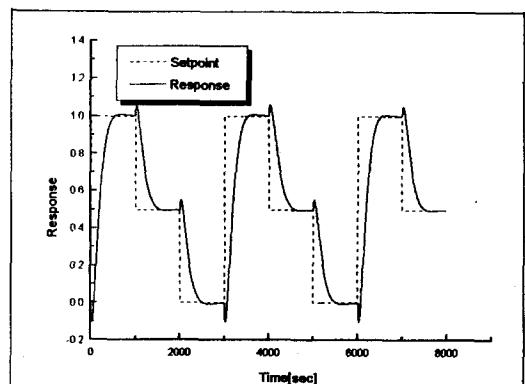


그림 4.1 PI제어기를 적용한 경우의 설정치 변화에 대한 유량 변화 특성

Fig. 4.1 Flow Variation characteristics for setpoint change using PI controller

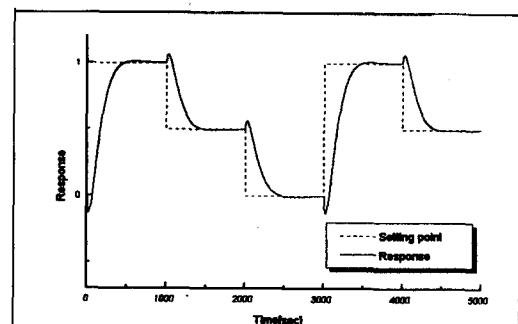


그림 4.2 2-자유도 제어기를 적용한 경우의 설정치 변화에 대한 유량 변화 특성

Fig. 4.2 Flow Variation characteristics for setpoint change using 2-DOF

한편 그림 4.4, 4.5는 외란에 대한 제어기의 성능을 검토하기 위해 PI제어기와 2-자유도 PID제어기 각각에 대해 계단응답을 가하고 2000초의 지점에서 외란을 인가한 경우 출력 특성을 나타낸 것이다.

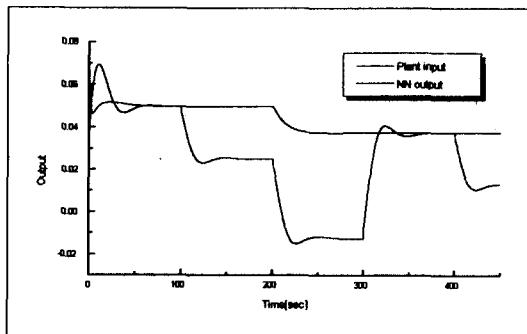


그림 4.3 신경망을 사용한 2자유도 제어기를 적용한 경우 계단식 설정치 유량 변화시 제어기 출력 및 뉴런 출력 특성

Fig. 4.3 Output of the neural and the controller in Neural controller to step setpoint

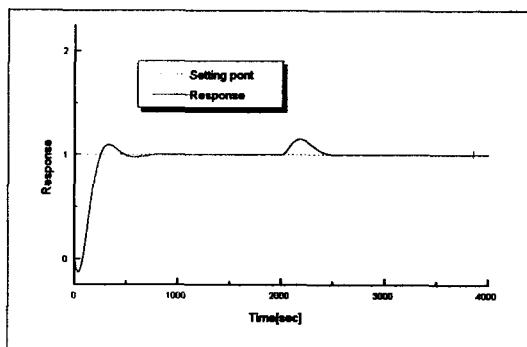


그림 4.4 외란을 인가한 경우 PI 제어기의 외란특성

Fig. 4.4 The Characteristics of output signal in the PI controller to disturbance

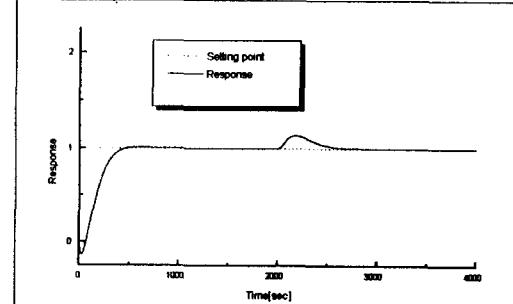


그림 4.5 2 자유도 제어기를 적용한 경우 외란에 대한 출력특성

Fig. 4.5 The characteristics of controller output to the disturbance using 2-DOF

PI제어기의 경우는 초기에 오버슈트가 크고 중간의 외란도 큰데 반해 2-자유도 제어기의 경우는 초기의 오버슈트가 없고 중간의 외란 크기도 적은 것으로 나타나고 있다. 또 그림 4.6, 4.7은 이때의 제어기의 출력신호를 나타내고 있다.

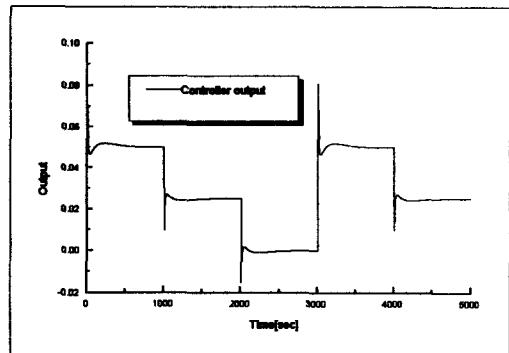


그림 4.6 2-자유도 제어기를 적용한 경우 설정치 변화시의 제어기 출력 특성

Fig. 4.6 The characteristics of controller output for set-point variation using 2-DOF

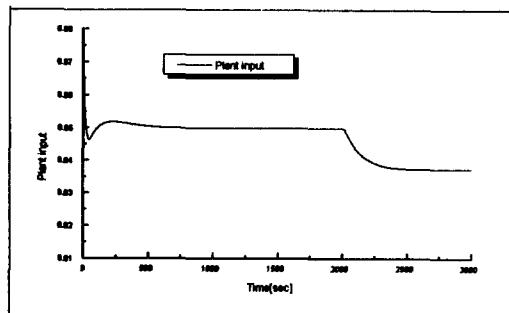


그림 4.7 2-자유도 제어기를 적용한 경우 외란시 제어기 출력특성

Fig. 4.7 The characteristics of output in 2-DOF controller to the disturbance

## 5. 결론

발전소나 화학 플랜트의 급수 및 순환수 계통은 물론 건물의 공조설비 유체계통, 정수 또는 폐수설비에서의 원수유량 및 약품 주입제어 등과 같은 유체계통은 대부분 밸브와 동력 펌프 등 대용량 전력설비를 이용해 유량 제어를 한다.

따라서 이들 유체계통의 제어방법 및 정밀도에 따라 그 시스템의 성능 및 에너지 절약에 많은 영향을

미치게 된다.

지금까지 이들 계통은 주로 PI제어기를 이용하였으나 이 제어 방법으로는 루프간의 간섭현상으로 정밀하게 유량 부하를 제어 할 수 없는 문제점이 있다.

본 논문에서는 유체계통 동력부하 설비를 다변수로 구성하여 2-자유도 PID제어를 적용하고 신경망 투우닝방법을 이용해 효과적으로 정밀하게 제어 할 수 있는 방법을 제시하고 시뮬레이션을 통해 그 방법의 우수성을 입증하였다.

시뮬레이션 결과 설정치를 구형과 형식으로 가변 시켰을 때 구형과가 상승부분에서는 오버슈트가 없었고 하강 변화에서는 오버슈트를 나타났으나 전반적으로 설정치 변화에 대해 잘 추종하였다.

한편 외란에 대한 강인성 시험에서는 계단식 변화에 대해 외란을 준 결과 곧 복구하여 강인성이 있음을 나타냈다.

따라서 압력과 유량을 측정하여 단일 루프로 제어 시스템을 구성하여 PI제어기로 제어하는 종래의 방법에 비해 다변수로 제어기를 구성하여 2-자유도 제어기를 적용하고 신경망 투우닝 방법을 적용한 시스템이 매우 만족스런 응답을 나타냈다.

### 참 고 문 헌

- [1] 中西英二, "工程制御 基礎", 朝創書店, 1992.
- [2] Nichols, "Instrumentation for process flow engineering", Technonics publishing company, 1987.
- [3] Michols A. Henson, "Nonlinear process control" Prentice Hall Inc, 1997.
- [4] H.Seraji, "Design of portional-plus-integral controllers for multivariable systems", INT.J.control, vol.29, no.1, pp.49~63, 1979.
- [5] 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.
- [6] 森剛志, "PID self-tuning controller", SICE, vol.1990, no.8, pp.29~34, 1990.
- [7] 김동화, "유량제어계통에 대한 지능형 제어 알고리즘 적용연구", 한국자동제어 학술회의, 1997.10.15 ~17, 서울.
- [8] 김동화, 2-자유도 제어기의 지능형 투우닝 연구, 한국자동제어 학술회의, 1997.10.15~17, 서울.

본 논문은 1996년도 한국과학재단 산학 연구 지원에 의해 이루어진 연구 결과입니다. 지원하여 주신 관계기관에 깊은 감사의 말씀 드립니다.

### ◇著者紹介◇



김동화(金東和)

1949년 11월 15일생. 1978년 명지대 전 기공학과 졸. 1983년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸(석사). 1991년 아주대학교 대학원 박사과정 졸(박사). 1993.3~현재 대전산업대학교 제어계측 공학과 조교수.