

## 2-자유도 제어기의 지능형 튜닝 연구

### Intelligent Tuning of 2-DOG Controller

김동화\*, 조일인\*\*, 이원규\*

\* 대전산업 대학교 제어계측 공학과(Tel:+82-42-630-0368;Fax:+82-42-630-0363;E-mail:kimdh@hyunam.trut.ac.kr)

\*\* 국제전자 정밀(Tel:+82-0434-32-5784;hitel gjj0605)

#### Abstracts

In this paper, Tuning method of the parameter P,I,D of the 2DOG-PID controller for having a required response to the disturbance and the setpoint is studied by the neural network.

This algorithms is simulated in the level control of the steam generator and the flow control system, and resulting represents than the conventional PIDcontroller.

### 1. 서론

외란과 목표치 두가지의 조건을 만족 할 수 있는 방법에 대한 2자유도 제어기의 구현 방법은 PID제어기 뿐만 아니라 현대제어 이론을 이용해서도 많은 연구가 이루어 지고 있으나 본 연구에서는 PID-2자유도 제어기를 신경망을 이용해 튜닝하는 문제를 연구한다.

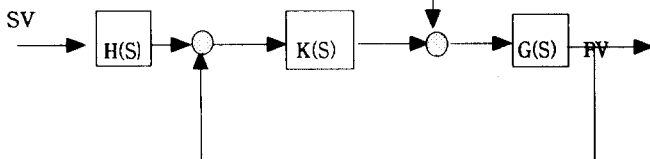
2자유도 PID제어의 경우 설정치에 대해 최적의 추종성을 갖도록 하기 위한 P,I,D 각 파라메터의 설정값과 외란에 대한 P, I, D파라메터의 설정값은 다르다.

일반적인 PID제어기로는 이와같은 두가지 조건을 만족하기가 매우 어려우나 2자유도 제어기를 이용하면 쉽게 만족스런 응답특성을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 2-자유도 제어기를 신경망을 이용해 튜닝하고 외란이 있는 유량제어계통 rhk 원자력 발전소의 증기 발생기 수위제어에 적용하여 그 응답특성을 연구하였다.

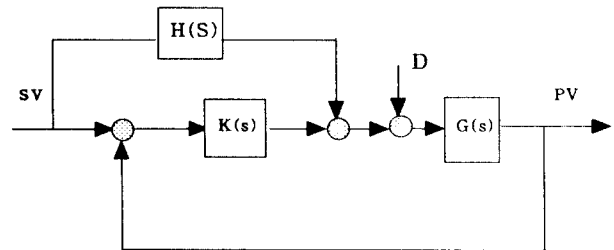
### 2. 2-자유도 PID제어기

2자유도 제어기(2-Degrees of Freedom Controller)는 1963년 I.M.Horowitz가 Synthesis of Feedback systems의 저서에서 5가지 모델을 제세한 것이 그 시초이다.

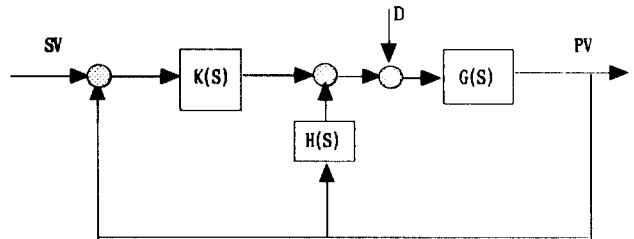


$$\text{필터전달함수 : } H(s) = \frac{K(T_2s + 1)}{T_1s + 1}$$

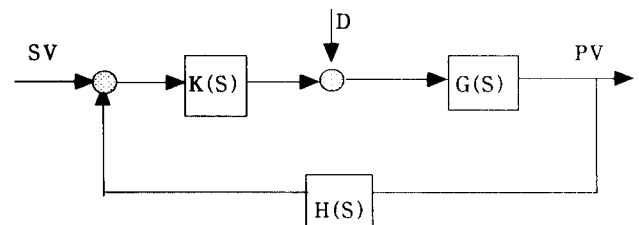
a) 목표치 필터형



b) 목표치 피드포워드형



c) 피드백보상형



d) 루프보상형

그림 2.1. 2자유도 제어기의 여러가지

Fig.2.1 Various configuration of 2-DOG controller

**2.1 목표치 필터형 2-자유도제어기**

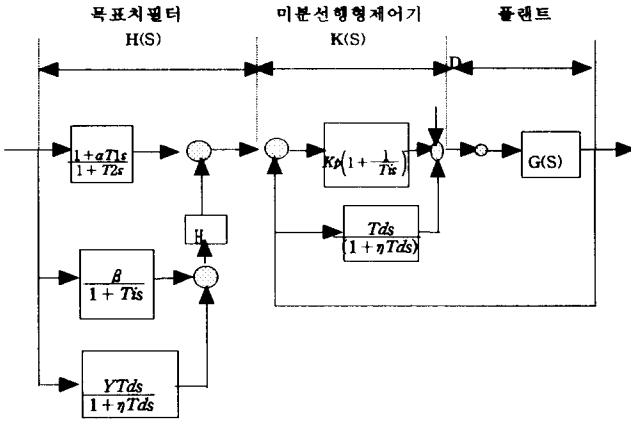


그림 2.2 목표치 필터형 2-자유도 제어기  
Fig. 2.2 Filter for desired setpoint value configuration of 2-DOF controller

목표치 필터형의 경우 폐루프 전달함수는 다음식으로 주어진다.

$$H(s) = \frac{1+aT_s}{1+T_s} + \frac{T_s}{1+T_s} \left( -\frac{\beta}{1+T_s} + \frac{\gamma T_s}{1+\eta T_s} \right) \quad (2.1)$$

- a = 2-자유도 제어기의 비례이득
- β = 2-자유도 제어기의 적분이득
- γ = 2-자유도 제어기의 미분이득

따라서 이들 a,β,γ를 적당히 조절하여 목표치에 잘 추종 할 수 있도록 한다.

**2.2 2-자유도 PID제어기의 튜닝**

2-자유도 제어를 하기 위해서는 식(2.1)을 만족하도록 각 계수를 결정하면 되므로 이에 대한 검토가 필요하다.

**2.2.1 적분값의 결정**  
적분값을 I라 하면

$$I = \frac{1}{T_i s} = \frac{\beta}{T_i s + 1} \quad (2.2)$$

가 되도록 β에 의해 T<sub>i</sub>가 변하는 연구가 이루어지고 있고 β에 의한 적분시간 T<sub>i</sub>는

- β = 0 (T<sub>i</sub>: 불변)
- β > 0 (T<sub>i</sub>: 大)
- β < 0 (T<sub>i</sub>: 小)

로 정한다.

**2.2.2 a, γ의 결정**

$$a = K_p \cdot / K_p, \quad \gamma = a \cdot T_D \cdot / T_D$$

- 단, K<sub>p</sub>: 외란억제 최적이득
- K<sub>p</sub>·: 목표치 추종 최적이득
- T<sub>D</sub>: 외란억제 최적 미분시간
- T<sub>D</sub>·: 목표치 추종 최적 미분시간

프로세스에 따라 이들 값은 다르므로 우선 외란에 대해 K<sub>p</sub>, K<sub>i</sub>, K<sub>d</sub>를 조정 한 후 목표치에 대해 α, β, γ를 결정해야 한다. 일반적으로 추천되고 있는 이의 값은 표 2.1과 같다.

표 2.1 2자유도 제어기 α,β,γ의 추천값

Table 2.1 Reference value of 2-DOF α,β,γ parameter

	α	β	γ
P-I-PD 제어(P만의 2-자유도)	0.4	0	0
PI-PID(PI만 2-자유도)	0.4	0.55	0
PID-PID(완전 2-자유도)	0.4	0.15	0.48

**2.2.3 튜닝 방법**

이의 튜닝 방법은 다음과 같이 두 가지 경우가 있다.

1) 2 자유도 PID 계수가 고정일 때

표 2.1에서 α, β, γ를 고정하여 2 자유도 PID 제어를 이용하는 것으로 종래의 PID 제어의 경우와 같이 K<sub>p</sub>, K<sub>i</sub>, K<sub>d</sub>를 결정한다. 이 경우는 K<sub>p</sub>, K<sub>i</sub>, K<sub>d</sub>가 외란억제를 최적으로 하도록 결정하면 목표치도 거의 최적으로 추종된다.

2) 2 자유도 PID 계수가 가변일 때

외란 억제와 목표치 추종을 엄격히 제어해야 될 시스템에서는 가변 2자유도 제어기를 이용한다. 이것은

- i) K<sub>p</sub>, K<sub>i</sub>, K<sub>d</sub>를 외란관에 대해 최적이 되도록 조정 한 후
- ii) 2자유도 계수 α, β, γ를 표 2.1의 값으로 결정한다.
- iii) 목표치 변화에 대해 목표치 추종 특성이 최적이 되도록 α, β, γ를 다시 미세하게 조정한다.

**3. 본 연구에서 사용한 2자유도 PID제어기**

본 연구에서 사용한 제어기 구조는 그림 2.3과 같이 미분동작을 목표치 필터측에 이동하여 조합시킨 것으로 제어편차 E에서 조작신호 MV에 이르는 루프가 바이패스 루프가 아닌 단일 루프로 되어 있기 때문에 제어편차 E를 이용한 비선형 처리가 간단하여 정확한 동시에 자유롭게 실현할 수 있는 구조를 갖는다. 그림 2.3에서 각각의 전달함수를 구하면

$$PM(s) = -\frac{MV}{PV} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_s} - \frac{T_s}{1+\eta T_s} \right) \quad (2.3)$$

$$SM(s) = \frac{MV}{SV} = K_p \left[ a + \left( -\frac{1}{T_s} - \frac{(1-\alpha)\beta}{1+T_s} \right) + \frac{\alpha \gamma T_s}{1+\eta T_s} \right] \quad (2.4)$$

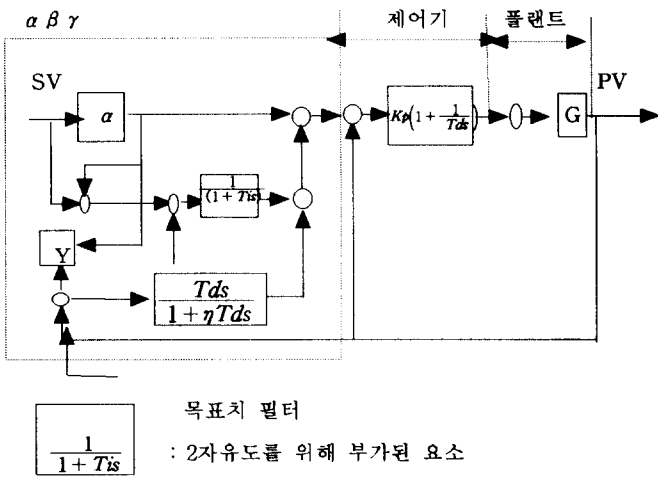


그림 2.3 다른 2자유도 PID제어기 구조  
 Fig. 2.3 Structure of others 2DOG PID controller

식(2.3)에서 프로세스량 PV가 변하면 종래의 PI와 근사한 D로 제어된다. 근사값 D는 일반의 불완전 연산식에 전달함수  $(1+T_i s)/(1+\beta T_i s)$ 로 표시되는 계수가 존재하는 것을 의미하나 이 계수는 초기치=1, 최종치= $\beta$ 로 되는  $\beta=1.35$ 부근의 값으로 되는 것과 D동작이 시간과 더불어 영으로 되는 것을 고려하면 실질적으로는 이 계수는 거의 2로 된다.

따라서 식(2.3)에서 프로세스량 PV가 변하면 PID제어 그것만으로 제어 될 수 있다. 한편 목표치 SV가 변화하면 식(2.4)의 비례이득은  $\alpha$ 배, 미분 이득은  $\alpha\beta$ 배, 적분시간 시정수  $\beta T_i$ , 크기  $(1-\alpha)(\beta-1)$ 의 1차 지연의 포화포화요소를 감하게 되어  $\beta$ 를 가변하여 적분시간  $T_i$ 를 등가적으로 변경하여 완전 2자유도 실현이 가능하다.

#### 4. 2자유도 PID제어기 튜닝

표 2.2 2자유도 계수  $\alpha, \beta, \gamma$ 에 의해 결정되는 자유도 특성

Table.2.2 The characteristics of degrees freedom by parameter  $\alpha, \beta, \gamma$

번호	2자유도계수			제어알고리즘 결과	비고
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$		
1	1	1	1	편차 PID제어	1자유도 PID
2	1	1	0	측정치 미분선형 PID(PI-D)	1자유도 PID
3	0	1	0	I-PD	1자유도 PID
4	$\alpha$	1	0	P만의 2자유도	불완전 2자유도PID
5	$\alpha$	1	$\gamma$	P-I-PD제어 (P만의 2자유도)	불완전 2자유도PID
6	$\alpha$	$\beta$	0	PD-I-PD (PD만의 2자유도)	불완전 2자유도PID
7	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	PID-PID제어 (PID전체의 2자유도)	완전 2자유도PID

일반적으로 사용하는 2-자유도 PID제어기의 튜닝은 다양한 방법이 시도되고는 있으나 실제 튜닝하는 P, I, D파라미터와  $\alpha, \beta, \gamma$ 를 적정값으로 결정하여야 함으로 그리 간단하지 않으나 아래와 같은 방법이 사용된다.

- $\alpha$  = 비례이득 2자유도 계수 ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )
- $\beta$  = 적분이득 2자유도 계수 ( $0 \leq \beta < 2$ )
- $\gamma$  = 미분시간 2자유도 계수 ( $1 \leq \gamma < 2$ )

2-자유도 제어기에서 파라미터  $\alpha, \beta, \gamma$ 를 변화시키면 프로세스 변화량 PV값에 대해서는 영향을 미치지 않으나 목표치 SV에 대해서는 추종성능에 큰 영향을 미치게 되는데 그림 2.3과 식(2.2), (2.3)에서 추천하는 2자유도 계수  $\alpha, \beta, \gamma$ 를 표로 나타내면 표 2.2와 같다.

일반적으로  $\alpha=0.4, \beta=1.35, \gamma=1.25$ 의 추천값을 사용한다. 본 연구에서는 이들의 값을 결정하는데 신경망을 적용하였다.

#### 5. 시뮬레이션 결과

그림 2.4는 신경망을 이용해 프로세스의 입출력 데이터에 의해 최소편차가 되도록 2자유도 PI제어기를 튜닝 한 결과로 2자유도 제어기가 신경망의 경우보다 우수함을 알 수 있다.

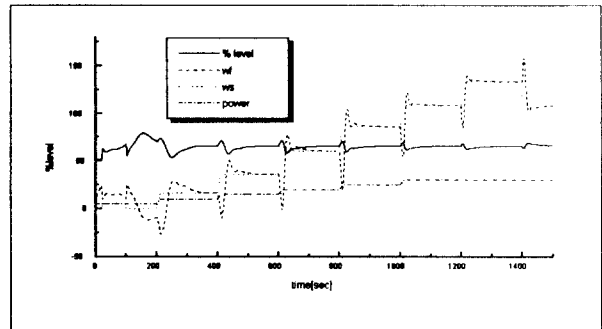


그림 2.4 기존의 PI제어기 이용한 증기 발생기 수위제어 결과  
 Fig 2.4. Level control of steam generator using the conventional PI controller

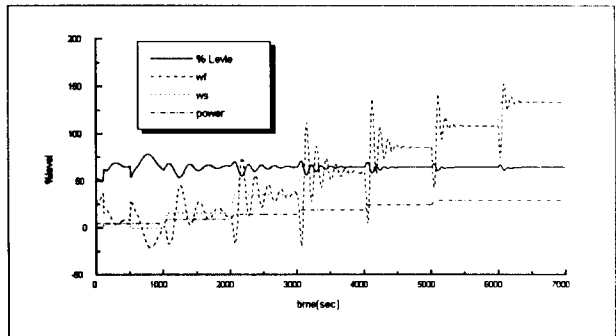


그림 2.5. 2-자유도를 적용한 경우 증기 발생기 수위제어 변화  
 Fig 2.5 Variation of level of the steam generator using 2-DOF

그림 2.4는 기존의 PI제어기를 증기 발생기 수위제어 계통에 적용한 경우 원자로 출력을 계단상으로 증가 시키면서 주 급수 유량, 주 증기 변화상태, 증기 발생기 수위변화를 나타낸 것으로 계단상 변화시점에서 많은 진동이 발생하여 원활한 제어가 될 수 없음을 알 수 있다.

한편 그림 2.5는 기존의 PI제어기 대신 2자유도 PID 제어기를 증기 발생기 수위제어 계통에 적용 한 경우 같은 방법으로 원자로 출력을 계단상으로 증가 시키면서 주 급수 유량, 주 증기 변화상태, 증기 발생기 수위변화를 나타낸 것으로 그림 2.27에 비해 매우 안정된 제어결과를 보이고 이있어 2-자유도 PID 제어기의 성능이 우수함을 알 수 있다.

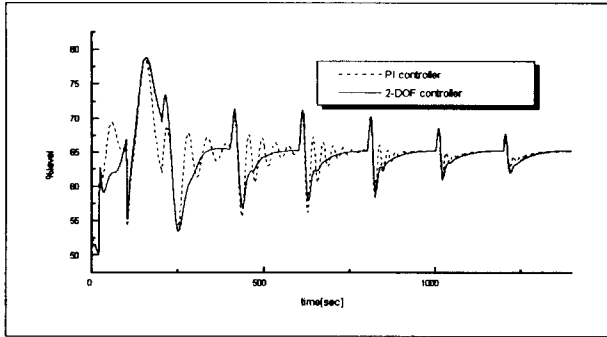


그림 2.6. 기존의 PI제어기와 2-자유도를 적용한 경우 증기 발생기 수위제어 변화비교

Fig.2.6 The comparison of the 2-DOF controller and the conventional controller

그림 2.6은 기존의 PI제어기와 2자유도 PID 제어기의 성능을 비교하기 위해 수위제어 결과만을 나타낸 것으로 기존의 PI제어기는 많은 진동이 있는데 반해 2-자유도 PID제어기는 원자로 출력이 변하는 지점에서만 오버슈트가 발생 할 뿐 다른점에서는 매우 잘 수렴하는 특성을 나타내어 2자유도 제어기의 우수함을 확실히 알 수 있다.

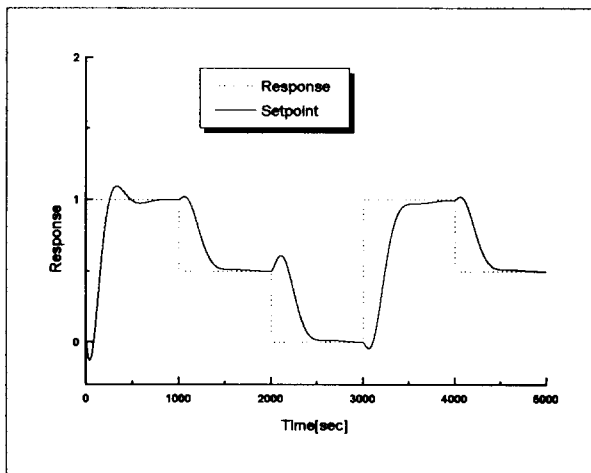


그림 2.7 유량제어계통에 대한 시뮬레이션  
Fig 2.7 Simulation in flow control system

그림 2.7은 유량제어계통에 2자유도 제어기를 적용하고 신경망을 이용해 튜닝한 결과로 설정치가변에 대해 잘 추종하고 있다.

### 참고문헌

1. S.Suzuki, "An autotuning method for control system parameters in nuclear power plants", Nuc.Tech,vo.58, pp.379-387, 1982.
2. K.J.Anstrom, "Towards intelligent PID control", Automatica, vol.28, no.1, pp.1-9, 1992.
3. Zhen-Yu,"Fuzzy gain scheduling of PID controllers", IEEE Trans.on man & Cybernetids,vol.23,no.5,pp.1392-1398,1993.
4. 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.
5. K.J.Anstrom,"Intelligent tuning and adaptive control",1992,10,12-14, workshop in Seoul, Korea.
6. Yew PID제어기 Manual,1991.
7. Hidefumi,"Optimal parameters of two-degree-of-freedom PID system control systems",SICE,vol.23,no.9, pp.889-895,1987.