

2자유도 PID 제어시스템의 지능형 튜닝에 대한 연구

A Study on the Intelligent Tuning of 2-Degree of Freedom PID Control System

박성진, 강만원, 이규영, 이 환, 소상균
S. J. Park, M. W. Kang, K. Y. Rhee, H. Lee, S. G. So

국립 대전산업대학교 제어계측공학과

요 약

공정제어시스템을 위한 제어기로서 현재까지는 PID 제어기가 보편화되어 적용되어 왔으나 비선형 시스템이나 복잡한 시스템 제어를 위해서는 목표치 추종특성이 우수하며 환경이나 공정 파라미터변화에 둔감하여 외란에 대한 영향이 적은 제어기가 요구된다. PID 제어기로는 이러한 목적을 달성하는 데에 한계가 있기 때문에 이를 해결하기 위한 연구들이 활발히 수행되어 목표치 추종성능과 외란 억제력을 동시에 만족토록 하는 다양한 2자유도 PID 제어시스템들이 제안되었고, 본 연구에서는 먼저 현재까지 제안된 2자유도 PID 제어시스템들 중 제어성능이 가장 우수한 것으로 나타난 목표치 필터형 2자유도 PID 제어시스템(Target Value Filter Type 2-DOF PID Control System: 이하 TVF-2DOF)[2]보다 우수한 2자유도 PID 제어시스템을 제안하고, 이를 바탕으로 2자유도 선행필터(Pre-Filter)부분에 지능제어기법의 하나인 퍼지로직을 적용함으로써 PID 제어기의 장점과 퍼지로직의 장점을 동시에 활용하는 지능형 튜닝(Tuning)기법에 관한 연구를 수행하였고, 지능형 시스템이 2자유도 PID 제어시스템들보다 목표치 추종성능 및 외란억제효과가 우수하다는 사실을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 입증하였다. 시스템으로는 유량 제어밸브가 사용되었다.

1. 서 론

공정제어시스템의 목적을 달성하기 위해서는 우선 플랜트의 출력을 정확하게 계측하고 제어해야 하는데 유량제어밸브의 경우 밸브 개폐정도에 따라 제품의 품질과 특성이 크게 달라지므로 정확하고 정밀한 밸브제어는 매우 중요하다고 할 수 있다. 현재까지 가장 많이 적용되고 있는 것은 PID 제어기인데 그 이유는 제어기 구성이 간단하고 현장에 대한 적응성이 좋기 때문이었다. 1940년대 Ziegler-Nichols가 PID 제어기법을 산업현장에 적용한 이래 현재까지 널리 쓰이고 있다. 그러나 산업이 점차 고도화되고 복잡해질 뿐만 아니라 보다 더 우수한 성능을 가진 제어시스템들의 필요성이 절실히 요구되는 상황에서 PID 제어기만으로는 한계가 있음을 알 수 있다. 예를 들면, 공정이 복잡해짐에 따라 시스템이 비선형화 하며, 또한, 유량제어의

경우 온도, 산성도, 점성, 유량 등과 같은 많은 외란의 요인들이 존재하기 때문에 이러한 복잡한 시스템에 대한 목표치 추종성능과 외란 억제를 동시에 만족시키는 제어기로서 PID 제어기만으로는 부적합하다. 이러한 PID의 문제점을 보완하기 위해 2자유도 제어시스템(2-Degree of Freedom Control System)이 1963년 I. M. Horowitz에 의해 최초로 제안[1] 되었으며, 계속적으로 꾸준한 연구가 진행되어 왔고, 가장 최근에는 TVF 2-DOF에 대한 연구가 수행되었다.[2]

본 논문에서는 2자유도 PID 제어기의 튜닝의 어려움 해소와 밸브 응답 특성 개선을 위해 기존에 제안된 TVF 2-DOF를 기준으로 하여 개선된 2 자유도인 $\alpha\beta$ 분리형 2자유도 PID 제어시스템을 도입하여 2자유도의 성능여부를 파악하였고, 2자유도 PID 제어기 튜닝의 효율성과 밸브 응답 특성 개선을 위해 2자유도 시스템에 퍼지로직을 선행필터로 사용

하는 지능형 튜닝에 관한 연구를 수행하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 성능확인을 실시하였다.

II. 본 론

1. 공기식 제어 밸브 모델링

프로세스 계장 시스템인 수처리, 보일러의 온도제어, 가스 압력제어 등과 같은 많은 분야에서 조작단인 밸브가 사용되는데 특히 식품공정이나 약품공정, 화학공정 등에서는 밸브의 개폐정도에 따라 화학 반응, 제품의 특성과 품질이 달라지므로 밸브 제어는 중요하다고 할 수 있다. 그림1에서 다이어프램의 면적을 A , 측정압력을 P , 다이어프램의 변위를 x , 스프링 상수를 K , 밸브의 관성을 M 이라 하면 이 운동에는 Newton 제2법칙이 적용된다. [2]

$$\frac{M}{K} \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{C}{K} \frac{dx}{dt} + x = \frac{A}{K} P \quad (1)$$

여기서 C 는 밸브의 축(stem)과 스프링에 의해 결정되는 상수이다. 식(1)을 라플라스 변환을 이용하여 변위 x 와 압력 P 사이의 전달함수를 구하고 일반적인 프로세스 전달함수를 이용하여 근사화시키면 식(2)와 같이 쓸 수 있다. [3]

$$G(s) = \frac{X(s)}{P(s)} = \frac{e^{-sL}}{s^2 + s + 1} \quad (2)$$

식(2)와 같이 2차 계의 전달함수로 나타낼 수 있다.

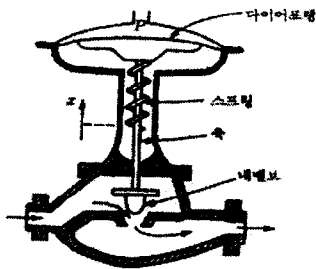


그림 1. 공기식 밸브의 모델링

2. 밸브 제어를 위한 2자유도 PID 제어시스템

2-1. 2자유도 PID 제어시스템 개요

제어계에서는 외란 억제와 목표치 추종특성 모두를 향상시키는 것이 요구되는데, 두 가지의 성능간에는 외란 제어 특성을 최적으로 하면 목표치 추종특성이 나빠지고, 역으로 목표치 추종특성을 좋게 하면 외란 특성이 나빠지는 상반관계에 있다. [4]

이를 개선하기 위해 제안된 시스템이 2자유도

PID 제어시스템인데 외란 억제를 위한 P , I , D 값을 정하고 목표치추종을 위한 $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ 값을 설정함으로써 두 가지 성능을 동시에 향상시킬 수 있도록 구성된 시스템으로써 파라미터의 구성방법에 따라 피드포워드형, 루프보상형, 목표치 필터형 등 여러 가지가 있다.

2-2. 목표치 필터형 2자유도 PID 제어시스템

시스템의 기본구조는 그림2와 같이 목표치 필터 부분 $[H(s)]$, 미분선행형 PID 제어기 부분 $[K(s)]$ 와 $F(s)$ 으로 구성되며 그림 2를 이용하여 출력에 대한 응답식을 구하면 식(3)과 같다.

$$Y(s) = \frac{H(s)K(s)G(s)}{1+[K(s)+F(s)]G(s)} R(s) + \frac{G(s)}{1+[K(s)+F(s)]G(s)} D(s) \quad (3)$$

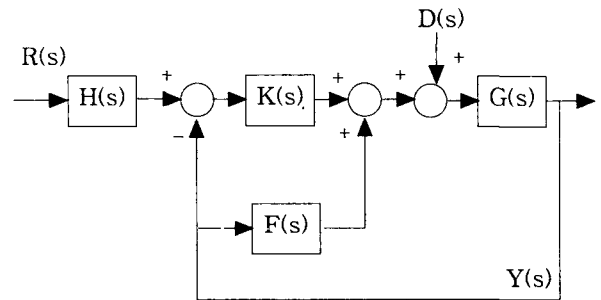


그림 2. TVF 2-DOF 제어시스템의 블록 선도

식(3)에서 보는 바와 같이 출력 $Y(s)$ 는 목표치 $R(s)$ 에 대한 성분과 외란 $D(s)$ 에 대한 성분으로 나누어지는데 $R(s)$ 입력에 대해서는 빠른 추종치를 갖는 것이 요구되고 $D(s)$ 입력에 대해서는 그다지 반응을 보이지 않는 강인성이 요구되기 때문에 2자유도 파라미터와 PID 파라미터값들을 적절히 조절함으로써 이러한 목표를 달성할 수 있다.

2-3. $\alpha \beta$ 분리형 2자유도 시스템

이 시스템은 목표치 필터의 $\alpha \beta$ 계수를 분리해 놓은 형태로 TVF 2-DOF의 구조를 개선한 시스템이다. 시스템 블록선도는 그림3과 같고 이때의 출력 응답식 $Y(s)$ 를 구해 보면 식(4)과 같다.

$$Y(s) = \frac{[C(s)\alpha + C(s)H(s)(\alpha-1) + \alpha\eta]G(s)}{1+[C(s)+F(s)]G(s)} R(s) + \frac{G(s)}{1+[C(s)+F(s)]G(s)} D(s) \quad (4)$$

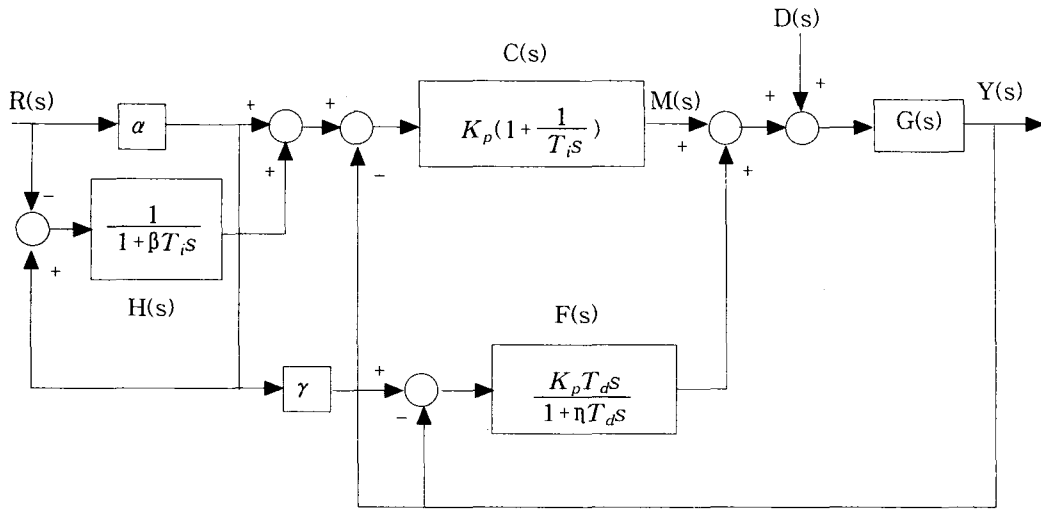


그림 3. $\alpha \beta$ 분리형 2자유도 PID 제어시스템

2-3-1. 외란억제 특성

식(4)에서 외란에 대해서 강인성을 갖도록 파라미터를 정리하면

$$C(s) + F(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \eta T_d s} \right) \quad (5)$$

P, I, D 값을 적절히 조정하면 외란 D(s)에 대해서 만족스런 응답을 얻을 수 있다.

2-3-2. 목표치추종 특성

식(4)에서 목표치추종 특성을 향상시키려면 식(6)의 $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ 값을 조정하면 만족스런 결과를 얻을 수 있다.

$$C(s)\alpha + C(s)H(s)(\alpha - 1) + \alpha\gamma F(s) = K_p \left[\alpha \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s} \right) + \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s + \beta T_i s^2} + \frac{\alpha\gamma T_d s}{1 + \eta T_d s} \right) \right] \quad (6)$$

2-4. 2자유도 PID 제어시스템의 지능형 튜닝

본 논문에서는 2자유도의 튜닝의 효율성을 개선함으로써 보다 우수한 목표치 추종성능과 외란억제 성능을 얻기 위하여 TVF 2-DOF 시스템의 필터부분에 지능형 퍼지를 선행필터로 적용하여 필터링 효과를 극대화하는 기법연구를 수행하였다. 목표치 필터부분을 퍼지제어로 튜닝한 형태의 블록선도는 그림 4와 같으며, 이때 2자유도 PID 부분의 PID 제어 파라미터들은 외란 억제를 위해 TVF 2-DOF에서 결정된 PID파라미터(P=0.8, I=0.7, D=0.7)들을 그대로 사용하였다. 퍼지입력으로는 그림4의 출력과 목표치 사이의 오차 e와 오차 변화율 Δe 를 사용하였고, 출력은 밸브의 개폐 정도를 나타내는 변수 u

를 사용하였으며, 각각에 대한 소속함수는 그림5, 그림6, 그림 7과 같이 정의하였다.

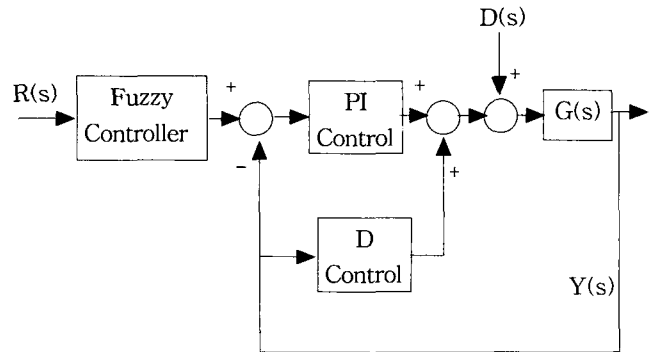


그림 4. 2자유도 PID 제어시스템의 퍼지튜닝 블록선도

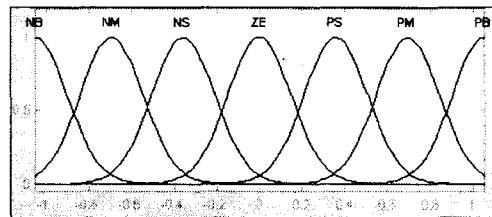


그림 5 오차 (e)의 소속함수

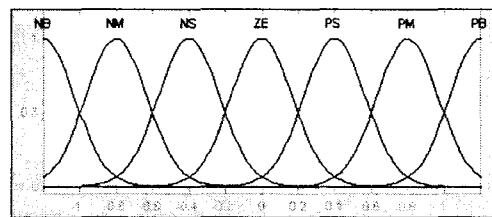


그림 6. 오차 변화율(Δe)의 소속함수

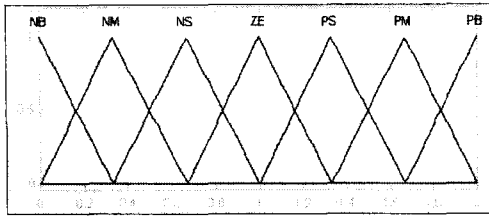


그림 7. 출력(u)의 소속함수

위의 퍼지 소속함수를 기본으로 제어기 설계에 일반적으로 많이 쓰이는 7×7 의 49개 룰(IF-THEN)을 사용하였고 추론 방법으로는 Mamdani의 Min-Max 법을 사용하여 제어기의 추론 과정을 수행하였다. [5] 비퍼지화(Defuzzification) 방법으로는 무게 중심(Center of Gravity)법이 사용되었다.

3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 그림3, 그림4 및 그림5를 MABLAB의 SIMULINK로 구성하여 TVF 2-DOF, $\alpha\beta$ 분리형 2자유도 및 지능형 튜닝을 위해 선행필터로 퍼지를 이용한 퍼지-2DOF 제어시스템의 추종성능과 외란 억제 특성들을 비교 분석하였다. 여기서 PID 제어 파라미터값들은 참고문헌[3]에서 사용된 값들($P=0.8$, $I=0.7$, $D=0.7$)을 그대로 사용하였다.

분석 결과 기존의 TVF-2DOF 제어시스템보다는 개선된 2자유도인 $\alpha\beta$ 분리형 2자유도 PID 제어시스템이 목표치 추종성능과 외란 억제특성에서 더 나은 성능을 보였으며 제안한 새로운 시스템 형태인 퍼지-2자유도 제어시스템은 개선된 $\alpha\beta$ 분리형 2자유도 PID 제어시스템보다 훨씬 우수한 성능을 보여주었다. (그림7 및 그림8 참조)

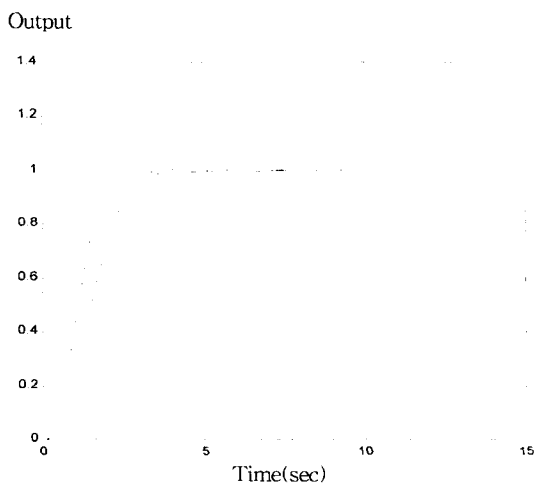


그림 8. 퍼지-2자유도 PID 제어시스템과 2자유도 PID 제어시스템들의 계단 응답 비교

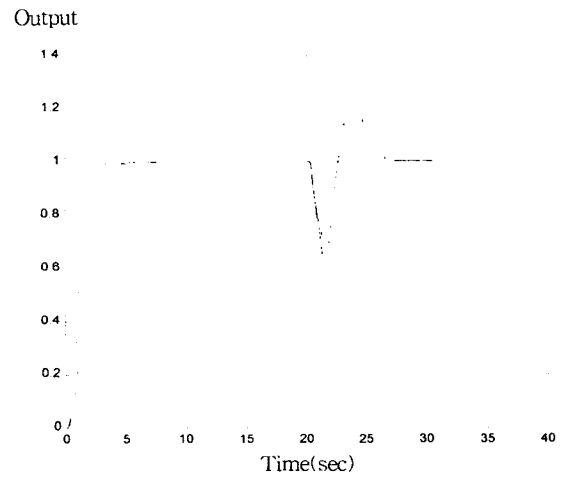
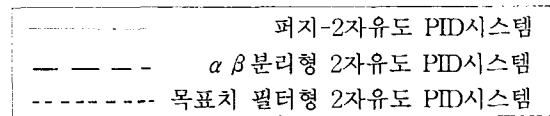


그림 8. 퍼지-2자유도 PID 제어시스템과 2자유도 PID 제어시스템들의 계단 응답 비교(외란 입력시)



4. 결론

이상에서 살펴본 바와 같이 본 연구는 2 자유도 PID 제어기들이 많은 제어변수들을 갖고 있어 시스템 변경이나 적용시 시스템에 적용하기가 다소 비효율적이고 튜닝하는데 있어 상당히 어렵다는 문제점을 해소할 목적으로 PID제어기의 장점과 퍼지로직의 장점들을 모두 이용하는 2자유도의 지능형 튜닝기법을 도입하였는데 그 결과 효율적인 튜닝은 물론 기존의 2자유도 PID시스템의 목표치 추종성능과 외란 억제 성능을 크게 개선할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Isaac M. Horowitz, "Synthesis of Feedback System", Chapter 6, Academic Press, 1963.
- [2] Thomas W. Weber, "An Introduction to Process Dynamics and Control", Wiley, 1973.
- [3] 윤경렬, "目標值 필터형 2自由度 制御를 이용한 制御 밸브 特性 研究, 1999.
- [4] 최순철 외, "프로세스 예측제어 시스템", 태광문화 출판사, 1993.
- [5] 오성권, "퍼지 모델 및 제어이론과 프로그램", 倭多利 출판사, 1999.