

평가함수를 이용한 I-PD컨트롤러의 튜닝

유항열, 이정국, 이금원, 이준모

관동대학교 정보기술공학부(E_mail : kwlee@kwandong.ac.kr)

A Tuning Method for I-PD Cotroller Using Performance Index

Yoo Hang Youal, Seung Youal Kim, Keum Won Lee and Jun Mo Lee

Devision of Information Technologies Eng., Kwandong University

Abstract

PID control has been well used for several decade. For PID algorithm, some tuning methods are used and with these parameters, control system is designed. But in some cases various kinds of performance are needed, so variable type of performance index must be utilized so that the designed control system meets the conditions.

This paper presents some linear combinational type of performance index and with numerical methods, the PID parameters are obtained. Moreover I-PD type controller is used so that this two degree of freedom controller may give more desirable output characteristics. Simulations are done with MATLAB m file and mdl files.

I. 서론

현대제어이론으로 대표되는 제어이론은 비약적인 기술 발전이 이루어져오고 있고, 새로운 제어이론 및 신기술이 연구되고 적용되고 있는 시점에서 불구하고 PID(Proportional, Integral and Derivative) 제어기는 아직 현장에서 많이 사용되고 있기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다. PID제어기에 있어서 파라미터 튜닝법은 많이 제시가 되어 있고^{[1]-[3]}, PID제어기의 구조 자체를 개량하여 보다 사용하기 쉽고 성능을 높이려는 시도를 해 오고 있다^[5]. 이는 PID 제어기는 일반적으로 구조가 단순하고, 하드웨어적으로 구현이 쉽고, 동조할 계수가 적어서 다루기가 용이하고, 대부분의 산업공정에서 그 값싼 제작비용에 비해서는 강인함을 보이는 장점을 가지고 있다.

일반적으로, 빌딩의 공조제어로는 제어 루프의 대부분이 실내의 온도 제어이고, 프로세스 제어의 형태이다. 그러나,

공조제어는 실내 기온을 측정된 것으로 실내를 환기하고 있기 때문에, 동작점이 수시로 변동한다는 점이 기타 화학, 철강 등의 프로세스 제어와는 다른 특징이 있다^[6]. 플랜트의 운전조건의 변화가 심한 경우나, 외기에 의하여 동작점이 변동한 경우 또는 잡음 등이 존재하는 환경에서는 이를 완전하게 커버할 수 있는 조정법은 존재하지 않는다^[11]. 따라서 현장에서 얻은 데이터를 기준으로 하여 목적을 잘 설정하여 강인하면서도 유연하게 대응할 수 있는 조정법이 필요로 되어 최근에 많이 연구가 되고 있다^[8].

본 논문에서는 플랜트의 전달함수를 1차지연 + 지연시간계로 하여 공조시스템을 표현하고, 그리고, 조작량을 구속조건으로 하여 에너지소비를 최소화 하게 하는 PID 파라미터를 탐색하여 최적의 제어성능을 얻고자 하며, 여기서 PID파라메타 값은 최적화법^[4]에 의하여 탐색한다.

이런 평가함수에 의해서, 에너지 소비 및 조작부의 손상·마모 등을 파라메타 조정에 반영할 수 있다. 비교를 위해서 PID방식과 I-PD방식으로 나누어 시뮬레이션을 하였으며 각각의 경우에 대한 파라미터는 최적화법에 의해 각각 추출하며, 기준입력 추종특성 및 외란 억제 특성을 시뮬레이션하여 잡음의 영향도 고려하였다.

II. 본론

1. 문제 설정

플랜트의 전달함수를 다음과 같이 설정한다.

$$G_p(s) = \frac{K_p}{1 + T_p s} e^{-L_p s} \quad (1)$$

여기서 플랜트는 액추에이터 및 센서를 포함한 식으로서 공조제어 시스템의 밸브개폐를 모델링 한 것이다. 여기서 T_p 는 시간변화율에 관여하고 있고, L_p 는 지연시간이다.

특히 이 시스템에서는 제어목적이 조작량이 작고 오차가 적어야 하는 것 외에 진동성분이 적어야 하기 때문에 이를 실현하도록 제어기는 설계되어야 한다.

많이 사용되는 PID컨트롤러 전달함수는 다음과 같이 설정된다.

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_I}{s} + k_D s \quad (2)$$

여기에서, k_p , k_I , k_D 는 PID제어기의 비례, 적분, 미분 Gain이다. 이 때, 제어기 구조는 기존의 PID외에 변형한 2자유도 형태의 I-PD 방식도 취함으로서 효율적인 제어기 구조를 탐색한다. I-PD 방식은 그림 1에 블록선도로 나타내었다.

일반적으로 I-PD방식을 취한 것은 다음과 같은 이유에서다^{[7][8]}. 외란억제에 관해 조정된 PID 파라메타 값을 이용한 경우보다는 I-PD방식으로 2 자유도 파라메타 값을 변화시키면, 오버슈트가 점차 적어져 거의 소멸하는 경향을 보인다고, 빌딩의 온도, 풍향등을 제어대상으로하는 공조제어에는 오버슈트가 적은 것, 또한 조정 파라메타가 적은 것이 바람직하다^[3].

2. PID 컨트롤러의 설계

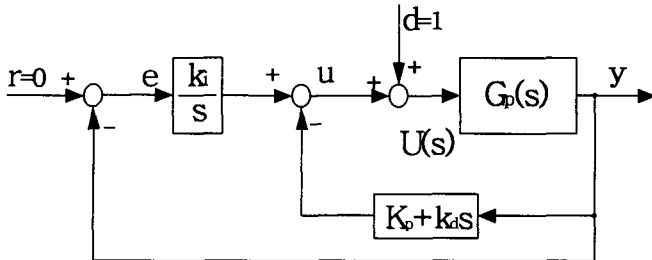


그림 1. I-PD 제어시스템 블록도

2.1 평가함수

빌딩의 공조제어등의 경우는 다양한 형태의 평가지표가 필요한데, 아래에는 최적화에 사용하는 평가함수를 대표적으로 사용할 수 있다.

$$ISTE = \int_0^{\infty} t e^2 dt \quad (3)$$

$$ISC = \int_0^{\infty} (u - u_0)^2 dt \quad (4)$$

$$ISTC = \int_0^{\infty} \left(\frac{du}{dt} \right)^2 dt \quad (5)$$

(3)식은 오차 $e (= r - y)$ 에 시간을 가중치로 곱한 것으로서 같은 오차라도 시간의 경과함에 따라 나타나는 오차에는 큰 가중치를 부여하고 있음을 보여 주고 있다. 즉 오차시간자승적분(ISTE)을 나타내고 있고 결과적으로

는 감쇠가 강한 응답을 얻을 수 있다. (4)식은 조작량에 관한 평가함수이고, 일반적으로 평가함수에 많이 사용되고 있으며 조작량의 에너지를 최소화하기 위한 지표(ISC)이다. 또, (5)식은 조작량의 변동 즉 진동에 관한 구속조건이며, 이는 조작량의 빠른 변동에 의해 진동이 되어, 조작부에 손상을 입히지 않도록 일정변동폭을 가진 조작량을 얻기 위해 지표(ISTC)이다^[11].

이러한 정의를 기초로, 평가함수를 다음과 같이 선형조합 형태로 정의한다.

$$J = ISTE + w_1 ISC + w_2 ISTC \quad (6)$$

여기에, 가중치는 제어목적에 따라 설계자가 $w_1 = 0 \sim 5$, $w_2 = 0.1 \sim 2.5$ 와 같이 적당히 선별한다. 또, 평가함수를 고려하는 시간은 그림 1에서 기준입력 또는 외란입력을 각각 스텝상의 외란을 인가하여 기준입력 추종성 또는 외란영향억제성을 보는 과정에서 정하며 공조 시스템에서 수십 또는 수백분까지로 설정한다.

2.2 최적화법

최적화법에는 공역구배법(Fletcher-Reeves의 방법)등을 도입할 수 있다^[5]. 이 방법은, 평가함수의 1차의 도함수만을 이용하고 최적해 탐색간격을 빠르게 한 방법으로 계산량 및 기억 용량도 적게 사용되고 있다. 그러나, 최소화해야 할 평가함수의 형태에 의해서는 극소값이 최소값으로 나타날 수가 있기 때문에 적당한 초기치를 사용하여 최적해에 도달한 것을 확인할 필요가 있다. 이때 최적의 평가함수 J 값의 여부는 평가함수의 선형조합항들이 2차형태임을 감안하면 미분값이 0인 곳에서 최소가 될 것으로 생각되며 수치해석을 위해서는 미분치대신 증분값이 다음과 같이 제한된 값으로

$$|\Delta J| \leq \epsilon \quad (= 10^{-9}) \quad (7)$$

처럼 적당한 최적화순서를 반복한다. 여기서 달성할 수 있는 수준은 step size에 의존하게 되는데, 점차 정밀하게 탐색하는 방법으로 여러번에 걸쳐 탐색한다면 더 적은 값들로 달성을 할 수 있고, 본 논문에서는 10^{-5} 로 설정하여 시뮬레이션에 적용하였다.

3. 계산 결과

시뮬레이션에서 사용한 값은 $K_p = 1$, $T_p = 10$ [min], $L_p = 1$ [min]이다. PID컨트롤러와 2자유도형태의 I-PD 방식의 파라메타 값들을 (6)식의 평가함수를 사용한 최적화법에 의해 추출하였고, 그 결과는 표1~3과 같다. 한편 비중계수는 $w_1 = 3$, $w_2 = 2$ 로 설정하였고, 두 방식에 동일하게 적용하였다. 여기서 사용된 최적화법은 단순하게

루핑을 통하여 최소화값을 결정하였고, 최적값을 나타내는 파라미터 값 근처에서 정밀하게 반복검사 함으로서 시간을 절약하였다. 이런 방법은 단순하지만, 극소치가 최소화값이 되는 것을 막을 수 있다.

표 1. PID 파라메타 동조

	Kp	Ki	Kd
I-PD 방식	7.60	1.98	2.02
PID 방식	8.19	1.97	1.92

표 2. 외란정정특성 성능지표

	ISTE	ISC	ISTC	J
I-PD 방식	1.006	5.580	0.014	17.774
PID 방식	0.966	5.590	0.014	17.764

표 3. 추종응답특성 성능지표

	ISTE	ISC	ISTC	J
I-PD 방식	15.94	4.063	5.175	38.479
PID 방식	3.944	6.156	6.461	35.334

4. 시뮬레이션 및 고찰

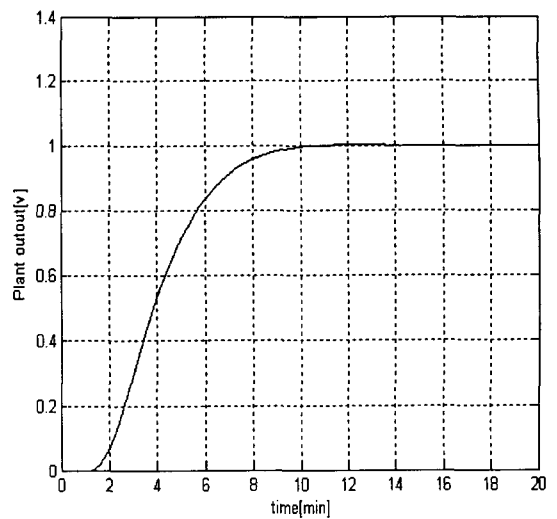
공조 시스템에 대한 PID 또는 I-PD제어 결과 기준입력의 추종성은 그림2의 (a) 및 (b)이다. 외란은 편의상 1분 후에 나타나게 하였다. 정정시간은 비슷하게 나타나 있으나 I-PD의 경우는 오버슈트가 나타나지 않고 진동이 없는 부드러운 출력을 보여 주고 있다. 여기서, 응답시간은 공조기의 특성상 수 십초에서 수 분으로 상당히 느린 편이다. 표 1을 보면, 어떤 구조를 선택해도 튜닝 된 파라미터는 비슷한 결과를 나타내고 있다. 외란정정 및 명령 추종에 대한 각 평가지표는 표 2 및 표 3과 같다. 이 값들은 Matlab mdl 파일을 사용하여 시뮬레이션한 결과로서 두 방식의 외란억제 특성 그림이 비슷하게 나온 것으로 나와 있기 때문에 표 3의 결과도 유사하게 나왔다. 그러나 명령추종의 경우는 오히려 PID구조에서 더 적은 값을 얻었는데, (b)그림을 보면 초반에 오버슈트가 생기면서 오차가 점점 많이 감해 지는 경향을 보임으로 해, ISTE값이 시간의 제곱으로 가중이 되어 있기 때문에 PID가 더 적은 평가함수 값을 나타내고 있다.

평가함수에서 가중치를 ISC(조작량자승적분)과 ISTC(조작량미분자승적분)에 3 : 2로 설정하였고 에너지소비 효율 및 조작부의 급격한 변화로 인한 피해를 시뮬레이션 결과로도 확인 할 수 있으며, 유사한 조작량임에도 불구하고, PID방식과 I-PD방식은 확연한 차이를 보이고

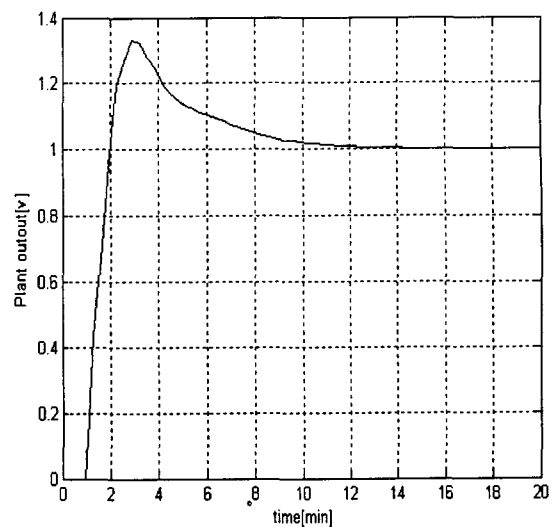
있다.

제어시스템에서의 입력은 밸브 개도율이고, 출력은 센서로 측정되는 실내온도로 볼 수 있는데, 여기서 급격한 입력의 변화는 에너지효율을 급상시키는 요인이 된다. 또 그림에서 PID방식에선 오버슈트가 25%가량 높게 나타났고, 정정시간도 12[min]가량으로 보이고 있으나, I-PD방식에서는 오버슈트 0%의 응답과 10[min]의 비교적 빠른 응답을 보이고 있다.

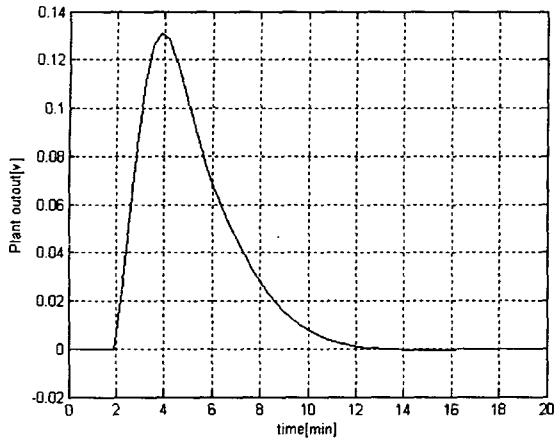
한편 가중치에 따라서 최적 평가함수 값이 틀려지므로 설계자는 제어목적에 맞게 가중치를 잘 설정하여야 할 필요가 있다.



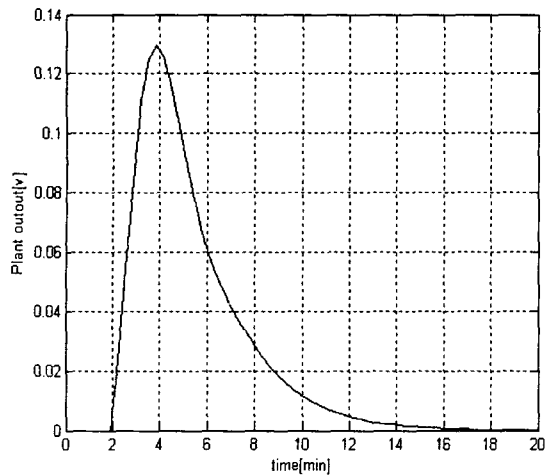
(a) I-PD 방식의 추종 응답 특성



(b) PID 방식의 추종 응답 특성



(c) I-PD 방식의 외란 억제 특성



(d) PID방식의 외란 억제 특성

그림 2. I-PD방식과 PID방식의 추종 응답 특성과 외란 억제 특성 비교

IV. 결론

빌딩내 공조시스템을 제어대상으로 하였으며 조작량, 시간 및 조작량 변화율이 포함된 평가함수를 사용한 PID 제어를 설계하였으며 최적화법에 따라 PID 파라미터를 구하였고, 구현시 I-PD방식과 PID방식의 응답을 비교하였다. 결론은 다음과 같다.

. 조작량의 변동율을 추가한 평가함수의 최적화는 결과적으로 진동이 적은 출력을 얻을 수가 있다. 그렇지만 시뮬레이션에 의하면 작은 변화분까지도 다 고려할 수는 없기 때문에 이에 대한 연구가 더 필요하다.

. 지역 최소값인 극소값이 답이 되는 것을 피하려고 하다 보니까 계산량이 과도할 수 있는데, 이는 여러번에 걸쳐 상세하게 탐색하는 방법을 취하여 계산시간을 단축하

였다.

. 평가지표상으로는 PID나 I-PD가 항상 우위에 있는 경우는 없이 상황에 따라 차이가 많았다. 다만 개별 지표의 경우에는 예를 들면, ISTC경우는 I-PD가 적은 경향을 보였다.

. 플랜트 특성의 변동이 심한 경우 주파수 성분을 고려한 견실안정성 등과 시간영역의 평가함수를 조합하는 등 새로운 다양한 평가함수 형태와 최적화기법에 대해서도 고려해 볼 필요가 있다.

참고 문헌

- [1] 小河守正, 片山徹, "特集PID制御技術の新しい展開," 計測自動制御學會論文集, pp34-7, 1998.
- [2] 須田ほか, *PID制御, システム制御情報ライブラリ-6*, pp46-47, 朝倉書店, 1992.
- [3] K.J.Åström and T.Hägglund, *PID Controllers, Theory, Design, and Tuning(2nd Edition)*, Instrument society of America, 1995.
- [4] Keisuke Ozawa, Yoshiyuki Noda, Takanori Yamazaki, Kazuyuki Kamimura and Shigeru Kurosu, "A Tuning Method for PID Controller Using Optimization Subject to Constraints on Derivatives of Control Input, SICE Vol.39. No. 3, March pp259-265, 2003
- [5] 荒木光彦, "2自由度制御系-I-PID・微分先行型・I-PD制御系の統一の見方などについて," システムと制御, Vo. 29, No. 10, pp649-656, 1985.
- [6] K.Kamimura et al., "CAT(Computer Aided Tuning) software for PID Controller," ASHRAE Transactions, Vo. 100, No. 1, pp180-190, 1994.
- [7] 重政, 芳谷, 大松, "セルフチューニング PID制御方式動向と事例," 計測と制御, Vo. 37, No.6, pp423-431, 1998.
- [8] 桑田流一, "改良形限界感度法とPID;I-PD制御鉛特性," 計測自動制御學會論文集, Vo. 23, No. 3, pp26-33, 1987.
- [9] J.Quevedo and T.Escobet Past, Present and Future of PID Control, Proc. IFAC Workshop, Terrassa, Spain, April 5-7(2000)
- [10] T.Kuo. *Optimal Control by Mathematical Programming*, Prentice Hall Inc, pp52-56, 1971.
- [11] K.Kamimura et al., "A Comparison of Controller Tuning Methods from a Design Viewpoint of the potential for Energy Savings, ASHRAE Transactions Vo. 108, No. 2. pp155-165, 2002.