

공정 Modeling 및 PID Tuning 프로그램 개발에 관한 연구

이상규
한국가스공사 연구개발원

Computer Programme Development for Process Modeling and PID Tuning

Sanggyu Lee
Korea Gas Corporation, R&D Center

서론

공정 설비의 안정적이고 효율적인 운영을 위해서는 자동제어가 필수적이며, 대부분 공정에 있어서 자동제어로 PID (Proportional, Integral, Derivative) 제어를 사용하고 있다. PID 제어기의 P·I·D 값은 같은 구조의 공정이라도 각 actuator의 현실적 특성과 운전 조건에 따라 그 값들이 다르게 적용될 수 있다. 즉, 설치할 때 각각의 제어 loop에 대하여 P·I·D 값을 찾기 위한 tuning을 실시되어야 하며, 공정의 구조가 변하지 않더라도 주기적으로 tuning을 실시하여, 공정이 최적의 상태에서 운영되도록 해야 한다.

공정의 자동 제어기에 있어서 많은 경우가 수동으로 운전되고 있는데 (Ender [1]), 정상운전(normal operation)에서는 단지 운전원의 주의만이 요구되나, 생산과 공급의 급격한 불균형이나, 외란에 의하여 공정의 상황이 바뀌었을 경우엔 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 이렇게 자동 제어를 수동으로 운전하는 이유로는 운전원들이 자동 제어를 믿지 못하는 경우가 많으며, 이는 대부분의 tuning이 제대로 되어있지 않기 때문이다. 즉, 운전원의 인식과 tuning을 위한 지원 시스템의 부족이 공정을 위협한 상황에 놓일 수 있게 만드는 것이다.

본 연구에서 개발된 시스템은 PID 제어기의 tuning을 위한 작업인 공정의 modeling 작업을 설비의 측정값만으로 수행하고, 구성된 model을 기반으로 PID tuning을 수행하는 2개의 부분으로 이루어져 있다. 개발된 시스템은 현장 사용자가 거부감 없이 가장 쉽게 접근할 수 있는 MS Excel™의 xla 형태로 구성되어 있다.

본론

제어 대상 공정 Modeling

공정의 제어를 위해서 설정하는 공정 model은 조작값 (MV: Manipulation Variable)에 대한 공정값 (PV: Process Variable)의 변화를 수식으로 표현하는 것이다. 그중 가장 널리 사용되는 model은 수식 (1)과 같이 시간지연을 갖는 1차 model이다 (Seborg 등 [2]).

$$\frac{PV}{MV} = G_p(s) = \frac{K_p e^{-Ls}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

공정 model의 parameters는 수식 (1)에 나오듯이 K_p , τ , 그리고 L 이며, 실제 공정에 맞는 이러한 3개의 parameters를 찾는 것이 제어기 공정의 modeling 작업이다. 수식 (1)에 표현된 model의 형태는 연속 값을 갖는 Laplace domain의 형태이기에 각 sampling에 따라 수집된 data에는 사용하기가 불편하다. 본 연구에서는 수식 (1)을 수집된 공정 data에 적용될 수 있도록 이산화하여 적용하였다 (Åström 과 Wittenmark [3]).

공정 modeling을 수행하는 방법은 조작값인 MV가 변화해서 공정값인 PV로 전달되는 현상을 보는 것이다. 개발된 시스템의 경우 MV와 PV의 관계를 이산화된 수식으로 풀었기에 제어기가 동작되고 있거나, 수동으로 MV 값을 변화하여도 modeling을 할 수 있으며, modeling을 위한 data는 각 sampling time의 MV와 PV data이다. 단 modeling data의 수집을 위해서는 관련된 충분한 범위 내의 PV값에 대한 data의 수집이 이루어져야 한다. 수집된 실제 공정의 n 번째 조작값 MV_n 에 대한 model 값을 PV_n 라하고, 실제 공정값을 PV_n' 라고 한다면, 공정 modeling을 위한 최적화

수식은 다음과 같다.

$$P = \min \sum_n (PV_n' - PV_n)^2 \quad (2)$$

즉, 실제 공정값과 model로 예측된 값의 차이가 가장 적어지는 K_p , τ , 그리고 L 값을 찾는 방법이다. 본 연구에서 중점적으로 적용된 공정의 actuator는 valve이었으며, 실험 결과의 분석에서 valve의 open시기와 close시기에 따라서 시간 지연 L 과 시상수 τ 값이 많은 차이를 보였기에, 개발된 시스템을 actuator의 상승시기와 하강시기의 model, 그리고 그 전체 data에 대한 model인 3가지 형태를 제시하도록 구성하였다.

제어 공정 Tuning

본 연구에서 사용된 PID 제어기 tuning 방법은 *DCLR (Desired Closed-Loop Responses)* 이다(Lee 등 [4]). DCLR 방법은 제목으로도 알 수 있듯이, 제어기가 포함된 전체의 loop를 Laplace domain으로 표현한 후에, 이를 원하는 제어기 응답에 대한 수식 형태로 맞추는 방법이다.

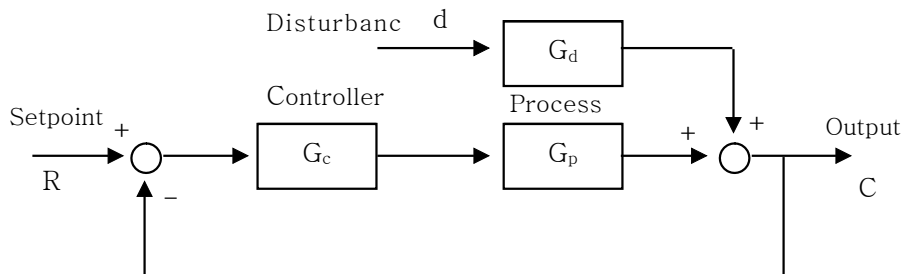


Fig. 1 PID 제어기 loop의 일반적 block diagram

일반적인 PID 제어기의 block diagram을 Fig.1에 나타내었다. 그림의 block diagram에서 setpoint와 output과의 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같이 정리된다.

$$\left(\frac{C}{R}\right) = \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} \quad (3)$$

그림에서 공정의 전달 함수인 G_p 는 PID 제어기에 반영할 수 없는 G_{p+} 와, 제어기 설계에 사용될 G_{p-} 로 분리된다.

$$G_p(s) = G_{p+}(s) G_{p-}(s) \quad (4)$$

즉, 시간지연과 Laplace domain의 오른쪽 반평면에 존재하는 모든 영점인 G_{p+} (단 $G_{p+}(0) = 1$)를 분리하며, DCLR 방법은 제어기 loop의 응답인 C/R 을 다음과 같이 정의한다.

$$\left(\frac{C}{R}\right)_d = G_{p+} l(s) \quad (5)$$

여기서 $l(s)$ 는 정착시간을 갖는 닫힌 loop의 응답형태이며, 저대역 filter를 적용한다. 여기에, G_c 를 일반적인 PID 제어기로 적용하여 수식 (3)과 (4), 그리고 (5)를 Maclaurin series로 풀어서 근접시키는 방법이 DCLR 방법이며, 자세한 풀이 및 결과는 Lee 등 [4]에서 찾아 볼 수 있다. 시간지연을 갖는 1차 model에 대해서 아래와 같은 tuning 결과가 제시된다.

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{\tau_I}{K_p(\lambda + L)} \\ \tau_I &= \tau + \frac{L^2}{2(\lambda + L)} \\ \tau_D &= \frac{L^2}{2(\lambda + L)} \left[1 - \frac{L}{3\tau_I} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

마지막으로 결정해야될 부분은 K 이다. 이 값이 작으면 전체 제어기 loop의 응답이 빨라지나 잘못하면 overshoot이나 불안정한 제어가 될 수 있으며, 너무 크면 응답이 너무 느려진다. 즉, 공정의 안정도나 modeling의 정확도에 따라서 결정되어진다. 특히, 앞에서도 설명하였듯이, 공정 modeling시에 제시되어지는 model은 단 한 개가 아니라 공정값의 상승 및 하강 그리고, 공정값의 위치에 따라 다른 model이 제안될 수 있으며, 다양한 K 값을 이러한 여러 개의 model에 대하여 적용함으로써 적절한 K 값을 설정할 수 있다.

LNG 생산공정

지하에서 뽑아 올린 천연가스는 액체 상태로 냉각된 후, LNG선박으로 전달되며, LNG 생산기지는 선박으로부터 LNG를 인수받아서 저장하고 기화시켜서 공급배관망으로 보내는 역할을 한다. 천연가스를 공급하는 공급배관망은 약 70 kg/cm²로 운영되고 있기에, 생산기지의 저장소에 상압으로 저장된 LNG는 고압 pump에서 승압한 후에 기화기에서 천연가스로 전환된다. 가스공사 인천생산기지는 27기의 고압 pump가 운영되고 있으며, 공급배관망의 압력 유지 및 설비 보호를 위하여 설비에 적합한 제어기의 tuning이 요구되고 있었다. 본 연구에서는 개발된 시스템을 Fig. 2에 표현한 고압 pump의 flowrate 제어를 사례 연구로 하였다.

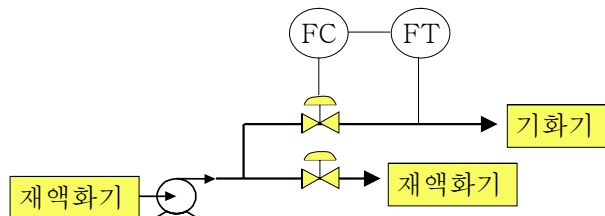


Fig.2 LNG 고압 pump 공정도

개발된 시스템에서 tuning을 위해 필요한 data는 actuator인 MV 값의 변화에 따른 공정값인 PV 값들이다. 사례 연구의 경우 PV 값이 정상 운전에서 상하 20%로 이동되도록 하여 약 10분 정도를 수집하였으며, sampling time은 제어 출력의 scan time인 1초로 하였다. 수집된 data는 MS ExcelTM에서 Fig.3과 같이 개발된 시스템인 XPro로 분석이 시작된다.



Fig. 3 MS ExcelTM 환경에서 XPro 시스템 호출하기

Fig. 4는 고압 pump인 P-305I를 개발된 시스템을 통하여 수행한 modeling 결과 화면이다.

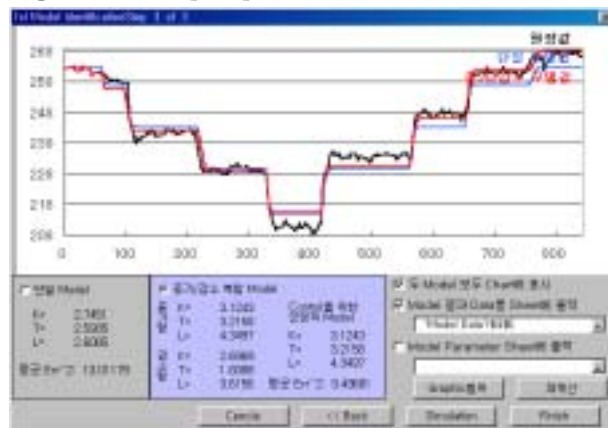


Fig. 4 고압 pump P-305I의 modeling 결과화면

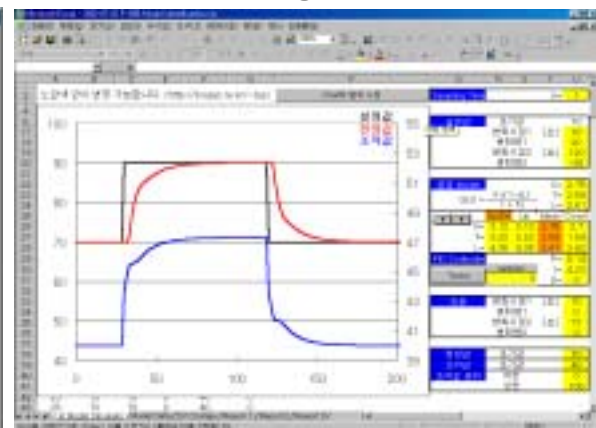


Fig. 5 P-305I model의 tuning 화면

Modeling 결과는 K_p , τ , 그리고 L 값이며, valve의 open시기와 close시기, 그리고 그들 전체 data에 대한 3가지 model로 제시되며, 각각의 이들 값은 tuning 프로그램(Fig. 5)과 자동으로 연계되어 각각의 P·I·D parameters의 조정에 따른 model 응답을 비교할 수 있다. 본 연구를 통해 조정되는 고압 pump의 유량제어는 유량 측정에 noise가 많이 있기에 PID의 D 값으로 0을 적용하였다.

Tuning 이전의 P는 0.4 이고 I는 20 이었으나, 시스템에 의하여 제시된 P는 0.14이고 I는 4.23이었으며, 이에 대한 공정의 응답을 Fig. 6과 7에 나타내었다.

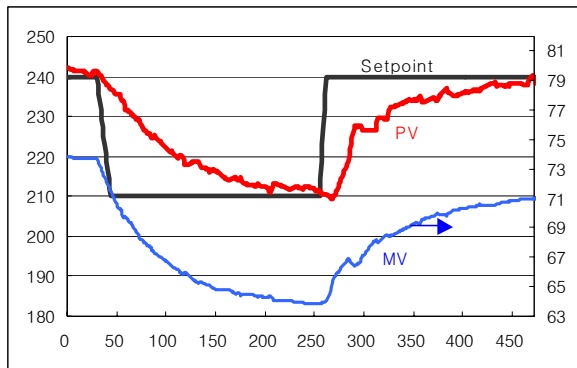


Fig. 6 기존의 P·I 값에 의한 제어 응답

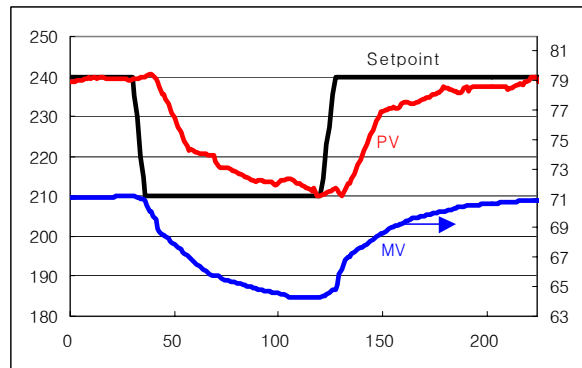


Fig. 7 조정된 P·I 값에 의한 제어 응답

제어기의 응답인 Fig. 6과 7에 나타나듯이 두 개의 응답은 비슷한 경향을 보이나, 그 응답 속도가 2/5로 줄어들었음을 알 수 있으며, 더욱 안정된 응답을 보였다. 개발된 시스템을 통하여 현재 10기의 고압 pump를 성공적으로 tuning하였으며, MS ExcelTM의 xla 형태로 구축되었기에 일반 운전원이 사용하여 modeling 및 tuning을 계속적으로 수행하고 있다.

결론

본 연구에서는 일반적으로 가장 널리 사용되는 PID 제어기의 tuning을 위하여 시간지연을 갖는 1차 model에 대한 modeling과 tuning을 수행할 수 있는 tool을 MS ExcelTM의 xla 형태로 개발하였다. 또한, 개발된 program은 web site (<http://www.kogas.re.kr/~lsg>)에서 얻을 수 있게 하였으며, 지속적인 보완 및 기능 확장을 하고 있다.

개발된 시스템의 modeling은 조작값들의 변화에 따른 공정값들로 계산되며, 이러한 modeling 결과는 tuning program에 연계되어 적용된다. PID tuning으로는 DCLR (Desired Closed-Loop Responses) (Lee 등 [4])을 사용하였으며, 다양한 현장의 적용사례를 통해 개발된 시스템의 효율성이 입증되었다.

참고문헌

1. Ender, David B., Process Control Performance: Not as Good as You Think, Control Engineering, September, 180 (1993).
2. Seborg, Dale E., Thomas F. Edgar, and Duncan A. Mellichamp: "Process Dynamics and Control", John Wiley & Sons Inc., (1989).
3. Åström, Karl J., and Bjorn Wittenmark: "Computer-Controlled Systems: Theory and Design", 2nd ed., Prentice-Hall International Inc., (1990).
4. Lee, Yongho, Sunwon Park, Moonyong Lee, and Coleman Brosilow, "PID Controller Tuning for Desired Closed-Loop Responses for SI/SO Systems", AIChE J., 44, 106 (1998).