



화학 및 가스 공정산업에서 주요 공정제어 기술

유성진 · 이창준* · †이종민

서울대학교 화학생물공학부, *삼성코닝정밀소재
(2010년 1월 4일 접수, 2011년 2월 24일 수정, 2011년 2월 26일 채택)

Major Control Techniques for Chemical and Gas Process Industries

Sung Jin Yoo · Chang Jun Lee* · †Jong Min Lee

School of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University
*Samsung Corning Precision Materials

(Received January 4, 2010; Revised February 24 2011; Accepted February 26 2011)

요 약

최근 석유 위주의 에너지원에서 가스나 신재생에너지와 같은 새로운 에너지원을 생산 혹은 이용하는 공정들에 대한 연구가 활발한 가운데 이러한 공정들의 상업화를 위해서는 조업 중 에너지 절감과 생산 단가의 경제성 확보가 필수적이며, 이를 위해서는 적합한 공정제어 기법의 도입이 필수적이라 할 수 있다. 본 논문에서는 지난 50여 년간 공정산업에 적용된 다양한 공정제어 기법 중 큰 기틀이 되는 몇몇 기술을 소개하고, 가스 관련 공정의 응용에 및 앞으로 나아갈 방향에 대해 논하였다.

Abstract - There has been much research interest in developing processes for production and utilization of gas and novel renewable energy resources. For these process to be economically viable, implementation of a suitable process control technique is required. This paper reviews some of the major process control techniques that have been developed over the last 50 years. In addition, some control applications in gas process industries are also presented with future directions.

Key words : PID, adaptive control, optimal control, model predictive control, gas process

1. 서 론

공정제어란 공정에 영향을 미칠 수 있는 여러 변수들을 조절하여 공정의 상태변수를 원하는 영역 또는 설정점(setpoint)으로 유지시키기 위해 수반되는 제반조작을 의미한다.

공정을 최적의 조건에서 효율적으로 운영하기 위한 한 가지 방법은 공정의 물리화학적 현상의 이해, 보존의 법칙을 통한 기본적인 모델링(fundamental mo-

deling)이나 시험자료 및 실제조업자료의 분석에 기반을 둔 모델링(empirical modeling)을 통해 공정이 최적의 조건에 있을 수 있도록 미리 조업조건을 설정하는 것이다. 그러나 실제공정과 그 주변 환경으로부터의 영향을 조업전에 완벽하게 이해하여 대비한다는 것은 사실상 불가능하며, 이를 보완해 줄 수 있는 방법이 바로 제어를 이용한 방법이다.

제어기술에 가장 기본은 되먹임(feedback)에 의한 것으로, 어떤 출력(output)이나 상태변수(state variable)가 원하는 영역에서 벗어났거나 설정점과 다를 경우 그 오차를 감지하여 공정의 출력이나 상태변수를 원하는 영역으로 이끌어 줄 수 있는 조작변수(ma-

†주저자:jongmin@snu.ac.kr

nipulated input variable) 값을 계산하는 것이다. 이러한 피드백 제어의 대부분을 차지하는 형태는 비례적분미분(PID) 제어이다[1]. PID 제어방법은 1940년대 이래 널리 이용되어 오고 있는 제어방법으로, 산업 현장에서 가장 많이 사용되고 있으며, 실제로 모든 공정제어 문제의 80~90%는 PID 제어방법에 의해 해결 될 수 있는 것으로 알려져 있다[2]. 그러나 많은 화학공정은 상호간섭이 존재하는 다변수 비선형 공정들이며, 시간지연이 존재하고, 실제조업에 있어서 다양한 외부교란 변수들이 공정에 도입되며, 이러한 시스템의 경우 적합한 PID 제어를 설계하기 어렵다[3].

1950년대 말 컴퓨터의 발달로 인해 조업현장에서 컴퓨터가 널리 사용되고, 상태공간에서의 해석방법이 이용되면서 시간영역에서 다변수계의 제어에 관한 연구가 활발해 졌으며, 제어의 연구는 새로운 세대로 들어서게 되었다.

최적제어(optimal control) 이론의 발달은 1950년대 공학과 경제학 분야에서 파생된 여러 문제들에 대한 반응으로서 시작되었다. 주요 문제는 항공기의 조종익면(control surface)을 고정된 위치에 안정화 시키는 것이었다. 강풍이나 돌풍 등에 의해 조종익면이 원하는 위치에서 벗어날 수 있기 때문에, 최소의 시간에 원하는 위치에 안정화 시키는 시스템 개발에 관한 연구가 수행되었다[4].

적응제어(adaptive control) 이론의 발달은 1950년대 항공기와 로켓의 높은 성능을 위한 자동조정장치의 설계로부터 시작되었다. 항공기의 응답 특성들이 비행 조건에 따라 크게 변하기 때문에 고전적인 제어를 이용해서는 만족할만한 제어효과를 얻을 수 없었고, 결과적으로 비행조건에 따라 자동적으로 적응하여 변할 수 있는 시스템에 관한 많은 연구가 이 시기에 수행되었다. 이러한 노력은 당시에는 큰 효과를 보지 못하다가 1970년대 들어 자가조정(self-tuning) 제어시스템의 발전과 함께 새롭게 관심을 받게 되었다[5].

모델예측제어(model predictive control)의 기본개념은 상태공간제어 기법이 소개되고, 이에 기반을 두어 최적제어가 활발히 연구되던 1960년대 초에 이미 성립되어 있었다. 그러나 당시에는 크게 주목받지 못하다가 1970년대 말 화학 공학자들에 의해 한정 조건들이 주어진 경우 모델예측제어가 다른 제어기법들에 비해 상당한 이점이 있음을 현장적용을 통해 입증함으로써 그 중요성이 부각되기 시작하였다[6,7].

지난 반세기이상 동안 공정제어는 복잡한 화학공정 조업에 있어 에너지 절감, 제품 품질 향상, 경제성

제고 등에 필수적인 기술로 산업계에서 자리잡아왔으며, 이에 발맞추어 학계에서는 이에 필요한 최신 공정제어 기법에 관한 이론적 개발이 진행되어왔다. 최근 에너지 절감이 절실한 현실에서 석유외의 신에너지원을 생산할 수 있는 공정에 관심이 많은 시점에서 이러한 신에너지 공정의 상업화를 위해서는 경제성 확보를 통한 상업적 스케일의 안정적인 조업이 선결 과제이다. 이러한 관점에서 공정제어는 앞으로도 많은 역할이 기대되고 있다.

본 총설에서는 현재까지 사용되고 개발되어온 다양한 공정제어 기술을 논하고, 이러한 기술들이 가스 관련 공정에 적용된 사례와 앞으로의 연구 및 응용 방향을 제시하고자 한다.

II. 선형시스템

비록 실제공정은 비선형인 경우가 많다하더라도 제어이론은 선형시스템에 대하여 개발되었는데, 그 주된 이유는 다양한 선형이론을 바탕으로 제어계에 포함되는 공정, 제어기, 센서, 밸브 등 다양한 개체를 통합하여 그 거동을 수학적으로 해석하기 쉽기 때문이다. 또한 비선형 공정이라 하더라도 조업 자체가 특정 조업 영역에서 많이 벗어나지 않는다면 선형으로 근사하여 해석이 가능하다.

공정에 관련되는 변수는 크게 입력변수와 출력변수 두 가지로 구분된다. 공정은 입력변수와 출력변수의 관계를 정의하는 매핑으로 볼 수 있고, 이때 입력변수는 수학적으로 독립변수에 출력변수는 종속변수에 속한다. 입력변수에는 조업자나 제어기가 직접 조작이 가능한 조작변수와 공정에는 영향을 주나 조업자나 제어기가 조작이 불가능한 변수인 외란변수가 있다. 조작변수와 출력변수의 수가 각각 1개씩이면 단일입력-단일출력(single-input single-output, SISO) 공정이라 하며, 각각 여러 개일 경우 다중입력-다중출력(multi-input multi-Output, MIMO) 공정이라 한다.

선형시스템은 이러한 독립변수와 종속변수 간에 중첩의 원리(principle of superposition)가 적용되는 시스템이다. 따라서 특정 크기를 갖는 입력에 대한 출력의 동적관계를 알고 있다면 이론적으로 다른 크기의 입력변수에 대한 출력변수의 응답을 그에 해당하는 상수만을 곱하여 계산할 수 있다.

선형시스템에서 연속 시간의 SISO 모델로는 라플라스 변환 영역의 전달함수(transfer function), $G(s)$ 가 주로 사용된다.

$$y(s) = G(s)u(s) \quad (1)$$

특히, 지연시간이 있는 1차계 전달함수는 다음과 같이 표시된다.

$$y(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (2)$$

여기서 τ 는 공정의 시상수이며, θ 는 지연시간, K 는 공정의 정상상태 시의 입출력 비인 이득값이다.

전달함수형태는 공정의 입출력변수만을 사용하는 모델이나 최근에는 정확성과 확장성 등의 장점으로 상태공간(state space) 모델을 많이 사용한다. 상태공간 모델은 공정의 동특성을 설명하는데, 필요한 상태변수를 종속변수로 가지고 있는 모델로서 연속시간의 경우 일반적으로 아래와 같은 모델 형태를 가진다.

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= f(x, u, p) \\ y &= g(x, u) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 x 는 상태변수 벡터, u 는 공정의 입력변수 벡터, p 는 모델 파라미터이다. 선형시스템의 경우에는

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (4)$$

의 모델을 취한다.

일반적으로 대부분의 제어이론은 이러한 선형시스템 이론에 근거하고 있으나 최근에는 비선형 모델에 기반을 둔 제어이론도 많이 발전하고 있는 추세이다[8].

III. 비례적분미분(PID) 제어기

공정을 제어함에 있어서 되먹임(feedback)은 제어하고자 하는 출력변수를 측정하고, 이를 설정점과 비교한 되먹임 오차를 이용하는 제어방법으로 많은 경우 효과적인 성능 향상을 가져다준다. 특히, 공정의 동특성을 예측할 수 있는 모델과 실제 플랜트간의 차이가 있다하더라도 되먹임이 이러한 차이를 어느 정도 보상할 수 있다.

PID 제어기는 SISO 시스템의 되먹임 제어에 가장 많이 쓰이는 형태로, 제어 루프의 90% 이상이 PID이다[1]. PID 제어기에서 적분(integral), 비례(proportional), 미분(derivative) 항은 과거(I), 현재(P), 미래(D)의 제어 오차에 관련이 있으며, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} p(t) - \bar{p} \\ = K_c \left[e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t^*) dt^* + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 t 는 임의의 시간, p 는 공압식 제어밸브의 열림정도를 조절할 수 있는 밸브상단 공기압이며, \bar{p} 는 이전 정상상태의 밸브상단 공기압이다. 그리고 e 는 되먹임 오차(feedback error)로서 $r - y$ (설정점-현재 출력값)로 정의된다.

식 (5)에서 알 수 있듯이 PID 제어기에는 비례상수 K_c , 적분상수 τ_I , 미분상수 τ_D 의 세 개의 조절 파라미터가 있으며, τ_I 와 τ_D 는 시간의 단위를 갖는다. 비례항은 현재 오차의 크기와 관련이 있고, P모드만 있는 제어기는 시스템을 설정점에 도달시키지 못하고, 편차가 존재한다는 단점이 있다[9]. 적분 항이 추가된 PI 제어기의 경우 오차의 누적된 양을 고려하고, 계단형태나 그에 근사하는 형태의 설정점 변화 혹은 외란에 대해 편차 없는 제어성능을 보일 수가 있다[10]. 일반적으로 편차를 없애는 제어기에 대해 “적분동작”(integral action)이 있다고 표현하기도 한다. 미분항의 경우 현재의 되먹임 오차의 시간에 대한 변화율로서 오차가 변화하는 추세를 나타내며, 미래의 제어 성능과 연관이 있다. 따라서 미분항은 run-away 반응과 같이 출력이 갑작스럽게 변하는 공정을 제어하는 데 유리하지만, 센서의 잡음이 많은 경우 제어기 성능을 저하시킬 수 있다는 단점이 있다.

PID 제어기의 설계와 조정은 Ziegler와 Nichols가 1942년에 시간지연이 존재하는 1차 공정 모델식의 시간상수와 이득 및 시간지연을 이용한 제어기 조정방법을 제안한 이후에 많은 연구가 되어 왔다[1]. 현재 산업계에서 가장 많이 쓰이고, 성능이 우수한 PID 제어기의 파라미터 조정방법은 내부모델제어기(internal model control) 조정방법으로 알려져 있다[11].

식 (5)에서 보듯이 PID 제어에서는 조작변수나 출력변수의 제약조건을 고려할 수 없다. 물론 계산된 조작변수 값이 제어밸브의 허용범위나 조작변수의 물리적 제약조건을 넘게 될 경우 제약조건을 경계값을 사용할 수 있으나 이는 운전에 부담을 줄 수 있고, 닫힌 제어계를 불안정하게 만들 수 있다.

이 외에도 PID 제어는 제어성능의 향상방안을 체계적으로 파악하는 것이 어렵고, 도입된 외란변수에 대하여 제어되는 변수가 매우 느린 반응을 보이는, 즉 시간지연이 큰 계의 경우에 적용하기가 어렵다. 따라서 이러한 경우 PID 제어기에 앞먹임(feedforward), 다단, 비율 제어기 등을 함께 사용하여 제어성능의 향상을 기대할 수 있다.

IV. PID 제어기의 강화(Enhancement)

4.1. 앞먹임 제어(feedforward control)

되먹임 제어의 단점은 외부 교란변수에 의한 보정 작용이 제어되는 출력변수가 설정점으로부터 벗어나기 전까지는 이루어지지 않는다는 것이다. 특히, 시상수가 크거나 시간지연이 큰 공정에 경우 되먹임 제어만으로는 원하는 성능을 얻을 수 없는 경우가 많으며, 그러한 경우 앞먹임 제어를 사용할 수 있다.

앞먹임 제어의 기본개념은 중요한 외부 교란변수를 측정하여 공정에 영향을 미치기 전에 미리 보정하여 주도록 하는 제어를 말한다. 앞먹임 제어 자체는 공정의 출력 측정값을 이용하지 않는다. 되먹임 제어만으로 만족스러운 제어 성능을 얻지 못하는 경우 앞먹임 제어를 결합하여 사용함으로써 성능 향상을 가져올 수 있다. 되먹임 제어와 앞먹임 제어구조를 간략히 나타내면 Fig. 1과 같다.

앞먹임 제어는 측정된 외부 교란변수와 함께 공정의 모델을 이용하여 제어기 출력을 계산하는 것이다. 앞먹임 제어기 설계에는 정상상태, 동적모델 모두 사용이 가능하며, 특히 동적모델을 사용할 때 모델의 역수행태가 제어기에 나타나는 경우가 많기 때문에 제어기의 구현이 물리적으로 불가능하거나 불안정해지는 경우가 있을 수 있으므로 주의해야 한다.

앞먹임 제어기 설계 시 공정모델의 정확성이 제어의 정확성을 좌우하므로, 주로 되먹임제어와 같이 사용하여 모델의 편차를 보상한다. 선형 시스템이거나 선형으로 근사할 수 있는 시스템의 경우 이미 존재하는 되먹임 제어에 앞먹임 제어기를 추가하여도 시스템의 안정성에는 전혀 영향을 주지 않는다는 장점이 있다.

앞먹임 제어는 1960년대까지는 산업에서 많이 쓰이지 않다가 그 이후로 보일러와 증발기, 고체 건조

기 등을 포함한 넓은 영역의 공정에서 적용되고 있으며 최근에는 실제공정에 많은 응용이 이루어지고 있다[7].

4.2. 다단제어(cascade control)

제어계에서 유량을 조작변수로 사용하는 경우가 많은데, 이때 유체를 공급하는 상류에 외란이 발생하는 경우 제어기가 지정한 유량대로 입력변수가 조절되지 않는 경우가 종종 발생한다. 이 역시 외란에 대처해야 하는 제어문제로, 앞먹임 제어를 고려할 수 있으나 실제 이러한 외란을 측정하기 어려우므로, 다른 대안으로 다단 제어를 많이 사용한다.

다단 제어는 주 되먹임 제어 외에 2차적인 되먹임 제어기를 추가시켜서 교란변수의 영향을 소거시키고자 하는 제어방법으로, 단일루프 제어 시스템의 성능을 높일 수 있는 가장 능률적인 방법의 하나이다. 그러나 기존의 단일루프에 비해 추가의 공정변수 측정이 필요하며, 적절한 추가 공정변수의 선정은 다단 제어기의 성패에 극히 중요하다.

다단제어에서는 두 개의 되먹임 제어기를 이용하며, 주제어기는 종속 제어기에 설정점을 계산하여 내려 보낸다. 유량을 조작변수로 삼는 제어계의 경우 주제어기는 유량의 설정치를 종속 제어기에 내려 보내고, 종속 제어기는 유량을 제어하려는 출력변수로 삼아 유량을 측정하여(따라서 되먹임 제어기) 이를 주 제어기가 원하는 값으로 유지시키기 위해 밸브의 열림 정도를 조절한다.

다단제어 구조에서 가장 중요한 점 중 하나는 종속 제어기의 동특성이 적어도 3배 정도 빨라야 한다는 것이다. 만약, 종속 제어기의 응답이 3배 이상 빠르지 않다면 다단 구조의 이점은 사라진다. 따라서 빠른 응답을 위해 종속 제어기에서는 주로 비례모드만을 사용하는 경우가 많다. 이 경우 제어 편차가 생길 수 있는데 이는 적분 동작이 있는 제어기를 주 제어 루프에서 사용하여 완전히 제거되지 않은 교란변수의 영향을 보정하면 된다. 따라서 다단제어 구조는 앞서도 언급했듯이 주로 유량을 조작 변수로 삼고 유량에 외란이 작용할 수 있는 시스템에 사용하는 경우가 많다[9].

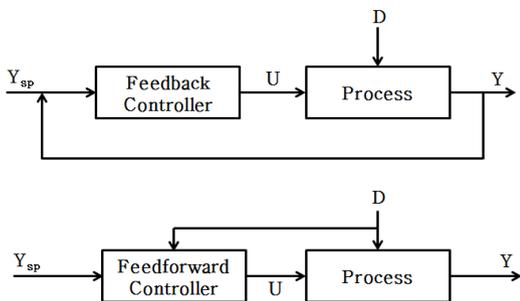


Fig. 1. Block diagram for feedback and feedforward controllers. D represents the disturbance variable.

V. 최적제어와 적응제어

5.1. 최적제어

최적제어 이론은 1950년대 컴퓨터의 발달과 함께 다양한 공학 및 경제학 분야에서 공통적인 특징을 갖는 동적 최적화 문제를 풀기 위한 한 방편으로 발전하기 시작하였다. 특히, Bellman의 다이내믹 프로

그래밍(dynamic programming)[12]이 이러한 문제의 기법으로 등장하면서 이론적 체계가 정립되기 시작하였다.

최적제어는 모델예측제어와 같이 최적화에 기반을 둔 최신 제어연구의 장을 연 분야이며, 제어를 목적함수와 최적화 변수를 갖는 최적화 문제로 구성하여 해를 구하는 것이다.

식 (6)과 같이 이산시간(discrete time)에서 상태공간의 식으로 기술되는 선형시스템을 고려할 때

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) \end{aligned} \quad (6)$$

상태변수가 원하는 정상상태에 가깝게 가도록 함과 동시에 조작변수가 과하게 움직이지 않도록 하기 위해서 다음과 같은 목적함수를 생각할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^T x^T(k+1)Qx(k+1) + u^T(k)Ru(k) \\ Q \geq 0, R > 0 \end{aligned} \quad (7)$$

위 목적함수는 이차식이고, 모델은 선형이므로 이러한 최적제어 문제를 linear quadratic (LQ) 제어문제라 한다. 이때, 조작변수 값은 상태변수 되먹임 형태인 $u(k) = -L(k)x(k)$ 로 놓고, 다이나믹 프로그래밍 기법으로부터 유도되는 Riccati 식을 풀어 $L(k)$ 행렬을 반복적으로 구할 수가 있다[13]. 이 문제는 또한 연속시간 공간 시스템에 대해서도 비슷한 방법으로 쉽게 풀 수가 있다.

LQ 제어는 상태변수 되먹임 형태의 제어를 사용하므로, 모든 상태변수 값을 측정해야 한다는 단점이 있다. 일부 상태변수만이 측정 가능한 경우에는 상태 추정방법을 통해 상태변수를 구한 후 제어를 구성할 수 있다. 이때, 모델 식에 가우스 분포의 잡음 변수를 더한 확률 과정으로 해석하여 측정되지 않는 상태변수를 추정하게 되어 이것을 Linear Quadratic Gaussian (LQG) 문제로 일컫는다[13].

최적제어 방법은 불확실성이 있는 공정에 대한 강건한 해를 구할 때도 사용이 가능하다. 이때, 목적함수는 평균값을 취하며, 그 계산도 매우 복잡하다. 일부 경우에는 불확실성이 있는 변수나 파라미터의 평균값을 이용하여 결정론적인 목적함수를 풀 수도 있으나, 이러한 해는 시스템을 불안정하게 만들 수도 있으며, 경제적으로 불리한 경우가 많다[14].

이 외에도 조업 목적에 부합하는 다양한 목적함수를 도입할 수 있으며, 공정의 운전 개시 및 정지에 활용할 수 있다[15].

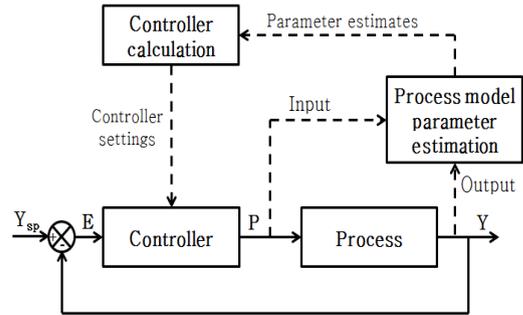


Fig. 2. A block diagram for self-tuning control.

5.2. 적응제어

적응제어는 제어대상인 시스템의 수학적 모델에 미지(unknown)의 불확실성이 존재하는 경우에 제어기의 구조나 제어 파라미터를 적절하게 변경하여 주어진 요구 성능을 만족하도록 하는 제어기의 설계이론을 다룬다. 실제 화학공정의 경우 계를 정확히 표현해 주는 파라미터를 구하는 일이 어려우며, 조업 조건이 달라짐에 따라 파라미터의 값이 변화하는 경우가 많기 때문에 파라미터 변화의 영향을 적게 받든지 아니면 이 변화에 따라 적응할 수 있는 제어기가 필요하다. 예를 들어 열교환기의 오염, 공정의 운전 개시 및 정지, 빈번한 교란변수의 변화, 제품의 규격이나 유량의 변화 등이 있을 수 있다.

공정의 변화가 예측 가능한 경우에 제어기의 설정이 예측된 공정변화에 따라 이루어지도록 하는 방법을 programmed adaptation이라고 하며, 공정의 변화가 예측 불가능한 경우에는 공정에 변화가 일어난 후에 제어기 설정이 가능하며, 이를 self-tuning 제어기 또는 self-adaptive 제어기라 한다.

Self-tuning 제어에서는 공정조건이 변함에 따라 공정의 출력을 바탕으로 공정모델의 파라미터들을 조정하여 준다. 제어기 파라미터들을 공정모델 파라미터들의 함수로 나타내면 공정의 변화에 따른 제어기의 자동적 조정이 가능하다. Self-tuning 제어기는 일반적으로 Fig. 2에서 보는 바와 같이 모델 파라미터들의 추정, 제어기 설정의 계산, 제어기 출력의 되먹임 루프 등을 거치게 된다[5].

따라서 이러한 적응제어기에는 공정변수나 파라미터를 추정할 수 있는 필터링과 같은 추정기법의 통합이 필수적이라고 할 수 있다.

VI. 모델예측제어

모델예측제어는 현재 알려져 있는 최신 제어방법들 가운데 가장 효과가 좋고 또 폭넓게 사용되고 있는

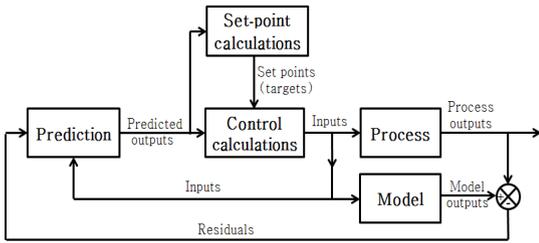


Fig. 3. Block diagram for model predictive control.

제어방법이다. 일반적으로 최신제어 또는 컴퓨터 제어 기법들은 그 설계과정과 설치가 있어서 기본적으로 대상공정의 수학적 모델을 이용한다는 점에서 모델기반 제어기법이라 통칭할 수 있다. 모델예측 제어는 제어하고자 하는 공정의 모델을 제어기의 출력을 계산하는 데 직접 사용한다는 점에서 모델을 직접적으로 사용하지 않는 PID 제어 등의 고전적 제어방법과 구별된다.

실질적으로 완벽한 제어효과를 얻을 수 있는 정확한 공정모델은 얻을 수 없으며, 따라서 모델예측 제어에서는 일반적으로 모델의 오차(실제공정과 공정모델과의 차이)를 되먹임형태로 포함시킨다[6]. 모델예측제어의 제어구조는 Fig. 3과 같다. 공정모델이 현 시점에서 앞으로의 특정 시간구간 내에서의 출력 변수값을 예측하기 위해 사용되며, 실제의 출력과 예측된 출력의 차이인 나머지(residuals)는 예측블록에 되먹임 신호로 제공된다. 예측된 출력과 원하는 출력 값과의 차이를 최소화하는 미래의 조작변수 값을 최적화하는 문제를 매 샘플링 시간 마다 풀고, 그 첫 번째 조작변수 값만 공정에 직접 적용하며 이러한 과정을 매시간 반복한다[7].

모델예측제어는 시간지연이 크거나 불안정한 공정, 그리고 변수 상호간 간섭이 심한 다변수 공정들에 탁월한 성능을 보여준다. 또한 최적화로 제어문제를 해결하므로, 제약조건들의 처리가 쉽게 이루어지고, 모델을 이용한 앞먹임 기능을 지닌다.

모델예측제어에서 이루어지는 기능을 요약하면 다음과 같다.

(1) 입출력 변수간의 동적모델을 이용하여 매 순간 t 에서 예측범위 N 에 대한 미래의 출력을 예측한다. 따라서 상태공간모델은 필요가 없으며, 입출력 모델만 있으면 계산이 가능하다. 예측된 출력 $\hat{y}(t+kt)$ ($k=1,2,\dots,N$)는 현재시간 t 까지 측정된 출력 데이터 및 적용된 입력과 미래의 입력 $u(t+kt)$ ($k=0,1,\dots,N-1$)에 따라 좌우된다.

(2) 예측된 출력이 미리 설정된 경로 $w(t+k)$ (이는 설정점이거나 이에 대한 근사가 될 수 있다)를 따르

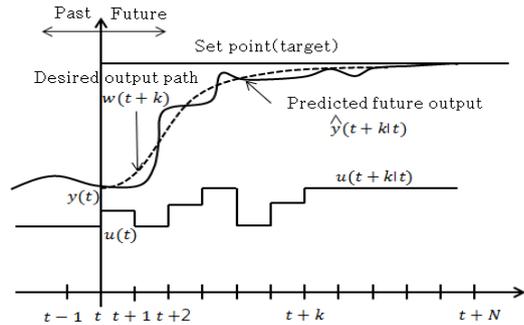


Fig. 4. Basic concept for model predictive control.

도록 하기 위하여 미리 정해진 목적함수를 최소화함으로써 미래에 적용될 입력값들을 계산한다. 목적함수는 통상 예측된 출력과 $w(t+k)$ 사이의 차이로 구성되는 2차 함수의 형태를 갖는다. 대부분의 경우 제어변수 자체도 목적함수에 포함된다. 목적함수가 2차이고, 모델이 선형이며, 제약조건들이 없다면 해석적인 해를 구할 수 있다.

(3) 실제 제어운전에서는 $u(t)$ 만을 공정에 적용한다. 다음 샘플링 순간에서는 $y(t+1)$ 이 알려진(측정된) 상태이므로, 이를 이용하여 위의 단계 (1)을 반복한다[16].

이와 같은 예측제어 방법의 개념은 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

모델예측제어의 상업적 응용은 계속 증가하고 있으며, 다양한 형태의 알고리즘이 존재한다. 자세한 내용은 [17]을 참고하기 바란다. 비록 모델예측제어가 PID로만 운전되던 공정에 많은 성능향상을 가져다주었지만 다음과 같은 제약점이 있다[18].

첫째, 실시간 최적화 문제를 풀어서 제어계산을 하기 때문에 공정의 거동을 비선형이나 하이브리드 모델을 이용하여 예측해야 할 경우 이에 따른 최적화 문제는 변수가 많은 비선형 계획 문제거나 혼합 정수 문제로서 실시간으로 풀기가 매우 복잡하다.

둘째, 앞에서 언급한 모델예측제어의 계산 방법은 열린계 최적제어 방법과 모델 예측 편차를 되먹임시키는 방법을 결합한 것으로, 이는 미래 시간에서의 추정값에 내재되어 있는 불확실성을 최적제어 계산에서 고려하지 못하는 구조이다. 다시 말해 모델예측제어는 결정론적인 최적화 방법을 사용하며, 미래 시간에서 발생할 수 있는 다양한 시나리오를 무시하고, 가장 그럴듯한 한 가지 시나리오만을 가정하여 계산에 사용한다. 따라서 공정의 불확실성을 쉽게 무시할 수 없는 경우에는 모델예측제어의 해가 최선이 아닌 차선의 해인 것이다.

VII. 공정제어의 가스산업 응용 예

공정제어 기법은 원료가스를 생산 혹은 사용하거나 독성가스를 다루는 공정에 많이 적용되고 있다.

독성가스의 경우 제련소의 전기 고로에서 발생하는 일산화탄소와 같은 유해가스를 분리해내는 off-gas 시스템은 출력변수의 측정이 어렵고, 변수간의 상호 작용이 많아서 다루기 까다로운 공정으로 알려져 있으며, 이 공정을 효율적으로 제어하는 데 모델예측제어[19]와 앞먹임 제어[20]가 성공적으로 응용된 사례가 있다.

원료가스와 관련하여 LNG 가스화 플랜트의 운전 효율 및 안전성을 높이기 위하여 다양한 모델을 제시한 연구도 진행되었다. 다변수 상관 분석을 LNG 플랜트의 deethanizer tower 출구 쪽 C3 농도를 예측할 수 있는 파라미터를 사용하지 않는 모델 구조로 제시하였으며 [21], LNG 저장탱크의 boil-off gas의 생성을 추정할 실험적 모델로 수행하였고, 탱크 내의 압력과 동적 모델을 연결하여 안전과 에너지 절약을 위한 최적 운전 알고리즘이 제시된 바 있다 [22]. 또한 TEALARC LNG 공정의 정치제어(regulatory control)시 자가 최적제어 방법을 이용하여 출력변수를 선정하는 방법에 관한 연구도 진행되었으며, LPG연료 주입 시스템의 효율 향상을 위하여 공기와 연료비의 비례 제어를 한 예도 보고되고 있다 [23].

VIII. 결론 및 제언

앞으로 석유에 대한 의존도를 줄이기 위한 노력이 정책적 및 기술적으로 많이 강구될 것이며, 이러한 노력이 원료가스, 석탄이나 바이오매스의 가스화 등 가스 관련 생산 및 처리 공정으로 현실화 될 때 에너지 절감 및 조업의 연속성 및 효율성 확보를 위해서는 공정제어 기술이 필수적이라고 할 수 있겠다.

기존 화학공정의 경우 PID, 최적제어, 적응제어, 모델예측제어 등의 다양한 기술들이 그 필요성에 의해 응용 발전되어 왔으며, 이러한 기술들이 앞으로 가스 관련 공정에도 많은 적용이 되리라 예상되고 있다. 본 논문에서 소개된 기본적인 제어기법 외에도 위에서 언급된 이들의 문제점을 해결할 수 있는 다양한 제어기법의 개발이 계속 진행되고 있어서 앞으로 그 응용분야 및 적용범위는 계속 넓어질 것이다. 마지막으로 공정제어 기술의 발전은 제어기 자체의 기술뿐만 아니라 계측기기, 공정의 모델링, 모니터링 및 상태 추정, 제어시스템의 유지보수 등의 기술들이 필수적으로 수반되어야 하므로, 가스 공정

에서의 이러한 기술의 응용 및 개발 역시 관심 있게 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 서울대학교 신입교수 연구정착금으로 지원되는 연구비에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- [1] Åström, K. J. and Hägglund, T., "The future of PID control", *Control Eng. Pract.*, **9**, 1163-1175, (2001)
- [2] Qin, S. J., "Control performance monitoring - a review and assessment", *Comput. Chem. Eng.*, **23**, 173-186, (1998)
- [3] Foss, A. S., "Critique of chemical process control theory", *AIChE J.*, **19**, 209-214, (1973)
- [4] Berkovitz, L. D., "Optimal Control Theory," *Am. Math. Mon.*, **83**, 225-239, (1976)
- [5] Seborg, D. E., Edgar, T. F., and Shah, S. L., "Adaptive control strategies for process control: A survey", *AIChE J.*, **32**, 881-913, (1986)
- [6] Morari, M. and Lee, J. H., "Model predictive control: past, present and future", *Comput. Chem. Eng.*, **23**, 667-682, (1999)
- [7] García, C. E., Prett, D. M. and M. Morari, "Model predictive control: Theory and practice-A survey", *Automatica*, **25**, 335-348, (1989)
- [8] Slotine, J.-J. E. and Li, W., *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, (1991)
- [9] Seborg, D. E., Edgar, T. F., and Mellichamp, D. A., *Process Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, (2004)
- [10] Francis, B. A. and Wonham, W. M., "The internal model principle of control theory", *Automatica*, **12**, 457-465, (1976)
- [11] Fisher D. G., "Process control - an overview and personal perspective", *Can. J. Chem. Eng.*, **69**, 5-26, (1991)
- [12] Bellman, R. and Rand Corporation, *Dynamic Programming*, Princeton University Press, Princeton, (1957)
- [13] Åström, K. J. and Wittenmark, B., *Computer-Controlled Systems*, 3rd ed., Prentice Hall, (1997)
- [14] Kleywegt, A. J. and Shapiro, A., "Stochastic optimization", *Handbook of Industrial Engineering*, G. Salvendy ed., New York, John Wiley & Sons,

- 2625-2649, (2001)
- [15] 이원규, 이광순, “최신제어 방법의 동향과 공정 제어 문제예의 응용”, *화학공학*, **20**, 97-112, (1982)
- [16] 여영구, *최신공정제어공학*, McGraw-Hill Korea, (2010)
- [17] Qin, S. J. and Badgwell, T. A., “A survey of industrial model predictive control technology”, *Control Eng. Pract.*, **11**, 733-764, (2003)
- [18] Lee, J. M. and Lee, J. H., “Simulation-based learning of cost-to-go for control of nonlinear processes”, *Korean J. Chem. Eng.*, **21**, 338-344, (2004)
- [19] Bekker, J. G., Craig, I. K., and Pistorius, P. C., “Model predictive control of an electric arc furnace off-gas process”, *Control Eng. Pract.*, **8**, 445-455, (2000)
- [20] Shang, H. and Scott, J. A., “Minimizing leakage from a smelter off-gas system by enhanced control”, *J. Clean. Prod.*, **19**, 70-77, (2011)
- [21] Santos, R., Almeida Neto, J. F., Campos, M., Embirucu, M., Fontes, C., and Kalid, R., “Multivariable correlation analysis with low sampling rate in output and its application in an LNG plant”, *J. Petrol. Sci. Eng.*, **66**, 33-41, (2009)
- [22] Shin, M. W., Shin, D., Choi, S. H. and Yoon, E. S., “Optimal operation of the boil-off gas compression process using a boil-off rate model for LNG storage tanks”, *Korean J. Chem. Eng.*, **25**, 7-12, (2008)
- [23] Michelsen, F. A., Lund, B. F. and Halvorsen I. J., “Selection of optimal, controlled variables for the TEALARC LNG process”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **49**, 8624-8632, (2010)