

총 설

반복학습제어를 기반으로 한 회분공정의 고급제어기법

이 광 순

서강대학교 화공생명공학과
121-742 서울시 마포구 신수동 1
(2006년 9월 11일 접수, 2006년 9월 13일 채택)

Advanced Control Techniques for Batch Processes Based on Iterative Learning Control Methods

Kwang Soon Lee

Depart. of Chem. and Biomol. Engng., Sogang Univ., 1, Shinsoo-dong, Mapo-gu, Seoul 121-742, Korea
(Received 11 September 2006; accepted 13 September 2006)

요 약

석유화학공업으로 대표되는 공정산업의 연속공정들은 지난 20여 년간 모델예측제어를 중심으로 고급제어(APC)기법들이 도입되며 운전성 및 생산성 향상에 많은 진보를 이루었다. 이에 반하여 중합반응기를 비롯한 각종 회분공정에는 APC 기법의 도입이 아직 활발히 이루어지지 않고 있다. 이것은 회분공정의 독특한 문제점을 극복하며 원하는 성능을 보장할 수 있는 방법론이 제시되지 못한 데에 가장 큰 이유가 있다고 할 수 있다. 그러나 최근 이러한 문제점들을 극복할 수 있는 APC 기법들이 반복학습제어(ILC)에 근거하여 개발되며 회분공정 APC 환경에 큰 변화가 일어나고 있다. 본 논문에서는 이들 기법들이 다양한 실제 공정에 활발하게 적용되어 운전을 개선할 수 있기를 기대하며, ILC를 기반으로 한 최근의 회분공정 APC 연구동향을 이론과 실례를 통해 소개한다.

Abstract – The operability and productivity of continuous processes, especially in petrochemical industries have made remarkable improvement during the past twenty years through advanced process control (APC) typified by model-based predictive control. On the other hand, APC have not been actively practiced in industrial batch processes typified by batch polymerization reactors. Perhaps the main cause for this has been the lack of reliable batch process APC techniques that can overcome the unique problems in industrial batch processes. Recently, some noteworthy progress is being made in this area. New high-performance batch process control techniques that can accommodate and also overcome the unique problems of industrial batch processes have been proposed on the basis of iterative learning control (ILC). In this review paper, recent advancement in the batch process APC techniques are presented, with a particular focus on the variations of the so called Q-ILC method, with the hope that they are widely practiced in different industrial batch processes and enhance their operations.

Key words: Batch Process, Advanced Process Control, Iterative Learning Control

1. 서 론

모델예측제어(MPC, model-based predictive control)를 중심으로 한 연속공정의 고급제어는 지난 20여 년간 비약적으로 발전하였으며, 많은 석유화학 및 정유공정의 표준제어기법으로 사실상 자리를 잡았다[1, 2]. 이에 따라 동특성이 비교적 잘 이해되고 있는 중류공정의 경우는 건설 당시부터 MPC가 함께 설치되는 일이 흔히 수행되기도 한다. 이에 반하여 회분공정의 고급제어는 그동안 상대적으로 매우 낙후되어 있었다. 여기에는 여러 이유가 있다. 우선 공정측

면에서는 석유화학의 최종제품이라 할 수 있는 각종 고분자물질들이 회분반응기에서 중합되는 일이 많지만 석유화학산업 전체에서 차지하는 비중이 여전히 높지 않으며, 또한 한번 안정화 시켜놓은 최종 제품의 품질이 새로운 제어방법의 도입으로 교란되는 것을 원치 않는 보수적인 문화가 그 원인으로 작용했다고 볼 수 있다. 그러나 사실 기술적인 측면에서도 회분공정은 연속공정보다 다루기 어려운 성격이 있고 이에 따라 고급제어기법도 현장에서 안심하고 사용할 수 있을 만큼 충분히 성숙되지 못했던 것에도 문제가 있다. 그러나 최근 획기적인 그리고 실용적인 회분공정 고급제어기법이 소위 학습제어(ILC, iterative learning control)라는 기법을 기반으로 발전되어 왔으며, 여러 회분공정에 대한 성공적인 응용 사례들

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: kslee@sogang.ac.kr

이 보고되고 있다. 본 논문에서는 회분공정의 여러 고급제어기법을 소개하되 특히 ILC를 기반으로 한 최근의 고급제어기법의 내용과 응용에 초점을 맞추고자 하였다.

2. 회분공정의 특성

제어의 관점에서 회분공정은 연속공정과 매우 다른 여러 성격을 갖는다. 이들 성격은 대부분 제어계 설계를 어렵게 하는 원인이 되며 이로 인해 실용적인 회분공정 고급제어기의 등장에 늦어졌다고 할 수 있다. 회분공정은 고분자 중합, 정밀화학, 반도체, 재료, 의약, 생물, 식품 등 다양한 산업에서 다양한 형태로 응용되고 있지만, 제어의 관점에서 볼 때에 대체로 연속공정과 다른 다음과 같은 특성들 나타난다.

(1) 연속공정은 제어문제가 외란 극복을 위한 regulation 문제로 대부분 주어지지만, 회분공정의 제어문제는 tracking 문제로 주어진다. 일반적으로 tracking 제어기는 regulation만을 목적으로 하는 제어기에 servo 기능을 부가하여 설계된다.

(2) 회분공정에서는 비선형성이 강하게 나타난다. 이것은 회분공정이 회분구간 전체에 걸쳐 비정상상태에서 운전되기 때문에 나타나는 특성이다. 연속공정도 공정자체는 비선형적이지만 특정 정상상태 주변에서 운전되기 때문에 선형모델로 동특성 표현이 가능하다. 그러나 회분공정은 넓은 범위를 이동하며 운전이 진행되기 때문에 비선형성이 강하게 노출된다. 이로 인해 회분공정에 대해서는 신뢰성 있는 공정모델을 얻기가 어렵다.

(3) 회분공정은 측정이 제한된다. 회분공정의 생산물은 회분운전이 끝나는 시점에서만 그 품질을 알 수 있다. 따라서 어떤 물질측정기를 설치한다 하여도 그 측정치는 측정 당시의 물질일 뿐 최종제품의 측정할 수 없다. 따라서, 최종제품의 품질제어를 실시간에서 수행하는 것은 본질적으로 불가능하다.

(4) 회분공정은 조작변수와 피제어변수의 수가 시간에 따라 변화할 수 있다. 예를 들어 반응기의 경우 특정 시점부터 새로운 조작변수가 도입되기도 하고 특정 구간 동안 새로운 변수가 측정되며 제어되기도 한다.

(5) 많은 회분공정이 물질 흐름이 차단된 상태에서 운전되므로 연속공정과 같이 실시간에서 외란이 유입되는 경우는 많지 않다.

(6) 회분공정은 일정한 회분구간 위에서의 동일한 궤적을 추적하는 운전이 반복된다. 그러나 공정에 따라서는 특정 물성을 측정하고 이에 근거하여 회분종료시점을 결정하기도 하며 이런 경우는 회분구간이 일정하지 않을 수 있다.

회분공정의 고급제어기법은 위에 기술한 특성들을 수용하며 이들 극복할 수 있는 것이어야 한다. 특히 2항의 모델 비선형성과 이에 따른 모델오차의 문제는 가장 심각한 것이라 할 수 있다. 그동안 회분공정에 대해서도 많은 모델기반 제어연구들이 발표되어 왔지만 상당한 모델오차를 가질 수 밖에 없는 실제 상황에서 얼마나 좋은 성능을 보일지는 미지수라 할 수밖에 없다.

3. PID제어기에 의한 피드백 제어

현재 많은 회분공정들은 연속공정에서와 동일하게 PID 제어를 이용한 피드백 제어로 공정을 제어하고 있다. 그러나 공정의 동특성이 시간에 따라 달라지기 때문에 이 변화 맞추어 제어기 조율을

프로그래밍하지 않고서는 적절한 제어 성능을 얻을 수 없는 경우가 많다. 실제로 산업체 중합 반응기의 경우, 피드백 제어가 제대로 동작되지 않아 특정 구간에서는 제어기를 수동으로 전환하는 경우가 흔하다. Fig. 1은 실제 회분중합반응기에서의 온도제어 상황을 일부 구간에 대해 보인 것이다. 제어기 조율이 제대로 되어 있지 않아 relay 제어 상황처럼 작동하고 있다. 그림에서 좌측 구간과 우측 구간이 매우 다른 한계주기(ultimate period)를 보이고 있다. 이것은 이 중합 반응기의 동특성이 이 두 구간에서 매우 다르다는 것을 의미한다. 이 진동특성으로부터 각 구간에서의 한계주기와 한계이득을 구한 후 PID제어기 조율값을 시간에 따라 스케줄링 한 결과, Fig. 2와 같은 제어결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 1, 2의 반응기에서와 같이 설정치의 변화가 공정의 동특성에 비하여 작지 않거나 느린 경우는 피드백제어만으로도 충분한 제어성능을 얻을 수 있다. 그러나 그렇지 않은 경우, 피드백 제어는 한계를 보일 수 밖에 없다. 피드백 제어는 제어오차가 감지된 후 이를 보정하기 위한 동작을 취하므로 설정치가 일정한 값을 유지하고 있지 않는 경우는 근본적으로 제어오차를 없앨 수 없다. 따라서 Fig. 3과 같이 설정치가 ramp로 변하는 경우 제어오차를 발생하는 것을 피할 수 없다. 실제 중합 반응기에서 문제가 되는 상황은 반응물의 초기온도 상승 후 개시제를 투입하여 반응이 시작하는

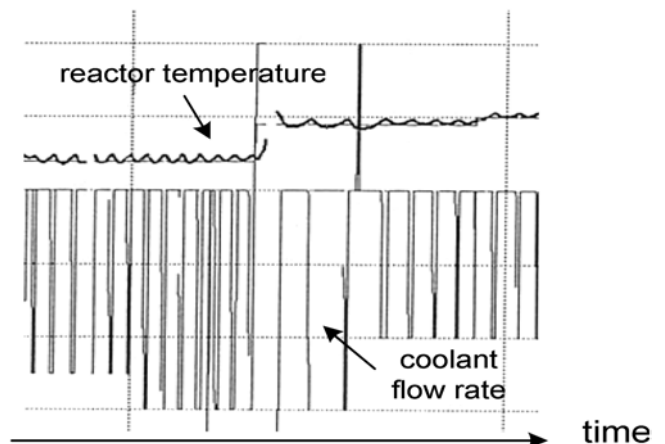


Fig. 1. Variation of the period of reactor temperature oscillation in an industrial polymerization reactor.

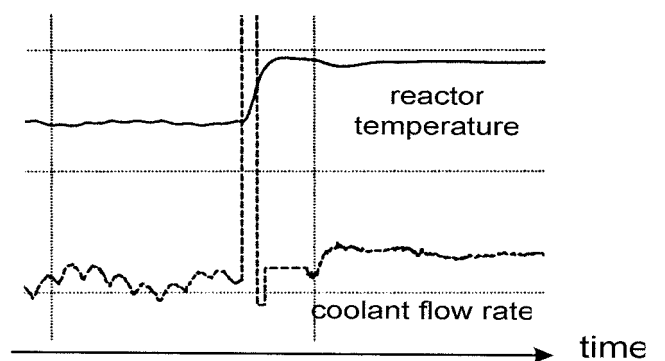


Fig. 2. Improvement of temperature control in Fig. 1 by scheduling of PID parameters.

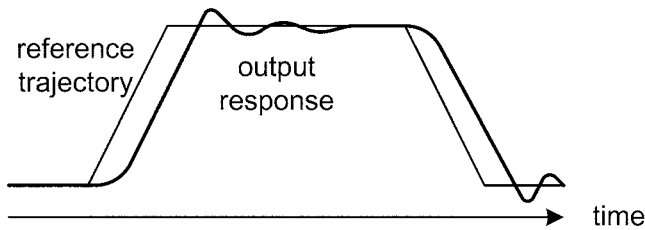


Fig. 3. By feedback-only action, PID control necessarily results in lagged response to ramp reference trajectory.

시점에서의 온도제어이다. 피드백 제어를 이용하는 경우, 제어오차가 감지되는 시점에서 반응은 이미 본격적으로 시작되어 있으며, 이 시점에서의 제어동작은 이미 때늦은 것으로 온도상승의 기세를 꺾기 어려운 경우가 많다. 이러한 문제를 해결하는 방안은 제어오차가 감지되기 전에 제어동작을 미리 가하는 것이다. 이 제어동작은 피드백으로 얻어질 수 있는 것이 아니며, 미리 계산되어 준비된 것이어야 한다. 그러나 이 피드포워드 신호를 계산하기 위해서는 정확한 공정모델을 아는 것이 필요하다. 예를 들어 이산시간 공정을 생각하고 공정의 출력이

$$y(t) = F(u(t)) \quad (1)$$

와 같이 표현된다면 주어진 설정치 변화 $r(t)$ 에 대해 $r(t) = y(t)$ 의 관계를 이용하여 $u(t)$ 를 계산하는 것이 가능하며 이 신호가 피드포워드 신호로 사용될 수 있다. 그러나 회분공정의 모델식은 상당한 오차가 포함될 가능성이 높기 때문에 신뢰성 있는 피드포워드 신호를 얻는 것이 쉽지 않다는 문제점이 있다.

4. 기존의 모델기반 회분공정제어 연구

위에서 언급한 문제점에도 불구하고 연속공정에서 많은 성공사례가 있던 모델기반 피드백/피드포워드 제어기법들을 회분공정에 응용하려는 시도가 꾸준히 진행되어 왔다. 이러한 시도는 회분중합 반응기[3-6], 회분반응기[7-10], 회분결정화기[11-14], 회분증류공정[15, 16], RTP와 같은 반도체 장비[17-19] 등 다양한 공정에서 시행되어 왔다. 그러나 이 접근방법에서 제어기의 성능은 모델의 정확성에 의존하게 되므로, 신뢰성 있는 공정 모델을 얻기 위하여 상당한 노력과 비용을 지불할 수밖에 없었던 것을 확인할 수 있다. 성공적인 적용사례의 경우도 공정의 변화, 원료의 변화 등으로 공정 특성이 달라지는 경우는 모델을 새로이 수정해야 하므로 상당한 비용과 노력이 재투입 되어야 한다.

5. 반복학습제어의 기본개념

5-1. 회분 단위의 적분제어

가장 이상적인 회분공정 제어기법은 상당한 모델오차가 존재함에도 불구하고 뛰어난 제어성능을 보이는 것이다. 얼핏 모순되어 보이는 이러한 제어요구를 만족시키는 것이 과연 가능할까 하는 의문이 들 수밖에 없다. 대답은 '가능하다'는 것이며 그 이유를 적분 제어기법을 통하여 설명할 수 있다.

PID 제어기의 적분모드가 일정한 값을 유지하는 설정치와 외란의 변화에 대해 잔류제어오차를 없애 주는 기능이 있음은 잘 알려져 있다. 이때 적분시간을 결정하기 위하여 정확한 공정모델을 알 필요는 없다. 이산시간대에서 적분동작은

$$u(t) = R_I \sum_{k=0}^{t-1} e(k) \Rightarrow u(t) = u(t-1) + R_I e(t-1) \quad (2)$$

로 표현된다. 이 동작은 제어오차 $e(t)$ 가 0이 아닌 값으로 남아있으면 이를 없애기 위하여 $u(t)$ 를 계속 증가 혹은 감소시키는 기능을 한다. 그 결과는 R_I 에 따라 제어오차 $e(t)$ 가 0으로 수렴하며 $u(t)$ 도 어느 일정한 값으로 수렴되거나, 아니면 모두 발산하는 둘 중 한가지로 나타난다. 수렴을 위해 R_I 가 정확한 모델에 의해 정교하게 선택될 필요는 없다.

이제 만약 회분공정이 일정한 회분구간 동안 운전되며, 추적해야 할 설정치 궤적이 동일한 패턴으로 주어지며, 또한 외란도 매 회분 동일한 패턴으로 입력된다면 회분 인덱스에 따른 적분제어를 (2)식과 동일하게 수행함으로써 잔류제어오차를 없앨 수 있을 것이다. 이것을 수식으로 나타내기 위하여 일 회분 구간이 N 샘플링 시점으로 구성되고, k 번째 회분에서의 입력과 출력, 설정치 궤적을 각각 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{aligned} u_k &\triangleq [u_k(0)^T u_k(1)^T \dots u_k(N-1)^T]^T \\ y_k &\triangleq [y_k(1)^T y_k(2)^T \dots y_k(N)^T]^T \\ r &\triangleq [r(1)^T r(2)^T \dots r(N)^T]^T \end{aligned} \quad (3)$$

회분 인덱스에 따른 적분제어는

$$u_k = H \sum_{n=0}^k (r - y_k) \Rightarrow u_k = u_{k-1} + H e_{k-1} \quad (4)$$

로 표현되며, 일반 적분제어와 동일한 이유로 이득행렬 H 값에 따라 e_k 가 0으로 수렴하든지 아니면 발산하게 될 것이다. 이때 수렴을 위하여 H 가 정확한 모델에 근거하여 정교하게 설계될 필요는 없다.

Fig. 4에 회분단위로 피드백되며 적분동작을 수행하는 제어상황을 보였다. 설정치 궤적의 패턴이 일정할 때, 그리고 동일한 패턴의 외란이 유입될 때에 H 를 적절히 선택한다면 회분이 반복됨에 따라

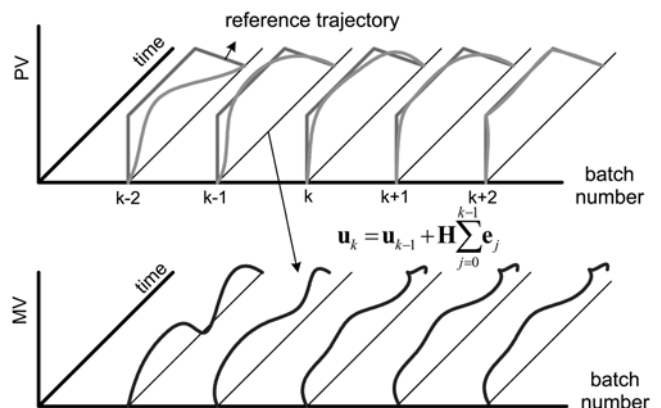


Fig. 4. Batch-wise integral control can completely remove the tracking error despite nontrivial model error.

제어오차가 계속 줄어들며 완전한 추적제어를 이루는 것을 볼 수 있다. 이 제어는 $k-1$ 회분의 운전결과를 이용하여 k 회분에 사용될 제어입력신호를 미리 계산하는 구조를 가지며, 이전회분에서의 운전결과를 학습을 통해 개선된 제어신호를 반복적으로 생성한다는 뜻에서 반복학습제어(ILC; iterative learning control)라 불리우고 있다. u_k 는 k 번째 회분의 피드포워드 신호로 사용될 수 있다. 따라서 ILC는 공정모델의 오차에도 불구하고 $\lim_{k \rightarrow \infty} e_k \rightarrow 0$ 를 만족시키는 정밀한 피드포워드 신호를 이전회분의 운전결과를 이용하여 계산하는 제어기법이라 할 수 있다.

5-2. 반복학습제어의 연구동향

ILC에 대한 개념은 이미 35년 전 Garden[21]에 의해 기술분야에 소개된 바 있으며, 이후 Miller와 Mallick[22], Uchiyama 등[23]에 의해 응용된 바 있다. 그러나 1984년 Arimoto 등[24]에 의해 새롭게 조명될때까지는 그 잠재된 기능이 충분히 인지되지 못하였었다. Arimoto 등은 로봇 팔이 원하는 궤적을 정확히 추종하도록 하기 위하여 소위 D-형 ILC라는 방법을 제안하였다. 이후 ILC는 그 목적에 따라 연속시간과 이산시간 알고리즘, 공정 모델에 의존하지 않는 알고리즘과 모델기반 알고리즘 등으로 나뉘며 다양한 형태들이 제안되었다. 여기서 모델에 의존하지 않는 알고리즘도 제어오차가 0으로 수렴하기 위해서는 제어기 이득이 일정한 조건을 만족시켜야 한다. 모델이 주어지는 경우는 이 수렴조건을 만족시키는 이득을 쉽게 구할 수 있을 뿐 아니라 목표하는 제어성능에 맞게 설계하는 것도 가능하므로 최근의 알고리즘은 대부분 모델을 기반하고 있다. 한편, 초기의 ILC는 SISO(single-input single-output) 공정을 대상으로 하였으나 최근에는 MIMO(multiple-input multiple-output)로 대부분 확장되었다. 출력변수의 차수가 입력변수의 차수보다 큰 MIMO 공정에서는 일반적으로 $e_k \rightarrow 0$ 을 만족시키는 것이 불가능하므로 ILC의 제어목표가 $\|e_k\| \rightarrow \text{minimum}$ 로 수정되어야 한다.

ILC는 대부분 결정론적 알고리즘으로 연구되어 왔으나, 외란을 좀 더 효율적으로 다룰 수 있도록 추계적 알고리즘들이 연구되기도 하였으며, 다음과 같은

$$u_k = u_{k-1} + H_1 e_{k-1} + \dots + H_N e_{k-N} \quad (5)$$

고차형 알고리즘이 제안되기도 하였다[25]. 결정론적 회분공정에서 고차형 알고리즘은 논리상 특별한 이점을 주지 못하지만, 추계적 공정에 대해서는 잡음을 필터링하는 효과가 있으며, 추계적 ILC 알고리즘이 결국 고차형을 갖는다는 것이 알려지기도 하였다[26].

위에서 소개한 ILC는 실시간 제어기능이 결여되어 있으며, 따라서 k 회분 운전이 진행되는 동안, 공정은 외란에 대응하지 못하고 open-loop 상태에 놓이게 된다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 실시간 피드백 제어기능을 결합하는 여러 방법들이 제안되기도 하였다. 일반적으로 실시간 피드백 제어기능이 ILC에 결합되면 ILC의 수렴성 등 수학적 성질들이 영향을 받는다.

ILC는 로봇 공학을 하는 기계 및 전기 분야에서 제안된 개념으로 그 응용도 역시 로봇 관련 분야에서 가장 활발하다. 이외에도 HDD와 같이 일정한 속도로 회전하는 공정, 반복작업을 하는 공장 기계 등에 많은 응용이 이루어지고 있지만, 지난 약 10년간 화학, 생물, 반도체, 재료 공학 분야의 각종 회분공정에 대한 응용이 급격히 증가하고 있다. Ahn 등[27]에 의해 최근 조사된 ILC 연구동향에서

이러한 경향을 뚜렷이 볼 수 있다.

본 논문은 회분화학공정에 대한 고급제어기법으로서 ILC를 소개하는 것이 그 목적이므로, 다양한 ILC 방법 중 이산시간 MIMO 추계적 ILC 기법을 대상으로 실용성 있는 몇 가지 prototype 알고리즘들을 소개한다.

6. ILC에 근거한 회분공정용 고급제어기

6-1. 회분공정의 모델

회분공정은 심한 비선형 공정이라 할지라도 주어진 설정치 궤적 주변에서 운전되는 경우에는 동특성이 시변(time-varying) 선형모델로 합리적으로 근사될 수 있다. 반복적으로 언급되는 것이지만 ILC는 상당한 모델오차를 용인할 수 있으므로 이 모델이 어느 정도 오차를 갖더라도 큰 문제가 되지 않는다. 이제 일 회분이 N 샘플링 시점으로 구성된다면 이 모델은 다음과 같은 시변 상태공간식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x(t+1) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) + K(t)v(t) \\ y(t) &= C(t)x(t) + v(t), t = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $v(t)$ 는 공정에 유입되는 외란과 측정잡음의 근원을 수학적 단일항으로 표현한 innovation이라 부르는 항으로, 통계적으로 zero-mean, 독립, 각 시점에서 동일한 확률분포를 갖는 랜덤신호이다. 그러나 서로 다른 회분 k 에서의 $v(t)$ 들은 상관관계를 가지며 독립적이지 않을 수 있다.

(3)식과 같이 회분 전 구간에서의 신호 벡터를 정의하고 (6)식으로부터 입출력 신호 벡터 사이의 관계를 구하면

$$y_k = G u_k - d_k \quad (7)$$

여기서

$$G \triangleq \begin{bmatrix} g_{1,0} & 0 & 0 & 0 \\ g_{2,0} & g_{2,1} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N,0} & g_{N,1} & \dots & g_{N,N-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$g_{n,m} \triangleq C(n)A(n-1)\dots A(m+1)B(m)$$

이며, d_k 는 $x(0)$, $v(\tau)$, $0 \leq \tau \leq N$ 의 함수로 표현되는 외란신호이다. d_k 는 서로 다른 k 에 대해 독립적인 zero-mean 신호 \hat{d} 와 상관관계를 갖는 \bar{d}_k 로 다음과 같이 나눌 수 있다.

$$d_k = \hat{d} + \bar{d}_k \quad (9)$$

여기서 \bar{d}_k 가 다음과 같은 백색잡음 n 의 적분형 상관관계를 갖는다고 가정하면

$$\bar{d}_k = \bar{d}_{k-1} + n \quad (10)$$

이제 $\bar{y}_k \triangleq G u_k + \bar{d}_k$, $\bar{e}_k \triangleq r - \bar{y}_k$, $e_k \triangleq r - y_k$ 를 정의하고, k 와 $k-1$ 에서의 (7)식의 차를 구하여 정리하면 다음과 같은 회분 사이의 전이식을 얻는다.

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{e}}_k &= \bar{\mathbf{e}}_{k-1} - \mathbf{G}\Delta\mathbf{u}_k + \mathbf{n} \\ \mathbf{e}_k &= \bar{\mathbf{e}}_k + \hat{\mathbf{d}}\end{aligned}\quad (11)$$

여기서 $\Delta\mathbf{u}_k \triangleq \mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k-1}$ 을 의미한다. 위 모델에 관한 좀 더 상세한 성격은 Lee 등[28]에 잘 기술되어 있다.

6-2. Q-ILC

실시간 제어가 없는 ILC문제는 $\mathbf{e}_{k-1}, \mathbf{e}_{k-2}, \dots$ 로부터 $\Delta\mathbf{u}_k$ 를 결정하는 것이다. 이것은 다음과 같은 목적함수에 의해 결정될 수 있다.

$$\min_{\Delta\mathbf{u}_k} \frac{1}{2} \{ \|\bar{\mathbf{e}}_{k|k-1}\|_Q^2 + \|\Delta\mathbf{u}_k\|_R^2 \} \quad (12)$$

여기서 $\|\mathbf{x}\|_Q^2 \triangleq \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}$, $\bar{\mathbf{e}}_{k|k-1}$ 는 $k-1$ 회분까지의 운전정보에 근거하여 얻은 $\bar{\mathbf{e}}_k$ 의 최적예측치를 의미하며 다음과 같은 Kalman 필터식에 의해 $\Delta\mathbf{u}_k$ 의 함수로 주어진다.

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{e}}_{k|k-1} &= \bar{\mathbf{e}}_{k-1|k-1} - \mathbf{G}\Delta\mathbf{u}_k \\ \bar{\mathbf{e}}_{k|k} &= \bar{\mathbf{e}}_{k|k-1} + \mathbf{K}(\mathbf{e}_k - \bar{\mathbf{e}}_{k|k-1})\end{aligned}\quad (13)$$

제약조건이 없는 경우, (12)식의 해는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta\mathbf{u}_k = \mathbf{H}\bar{\mathbf{e}}_{k-1|k-1} = (\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \mathbf{G} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{Q} \bar{\mathbf{e}}_{k-1|k-1} \quad (14)$$

이 알고리즘을 Q-ILC(quadratic criterion-based ILC)라 부르며 Lee 등[28]에 의해 제안된 것이다. Q-ILC는 기존의 모델기반 ILC의 문제점을 획기적으로 개선한 것으로 이론적으로, 실용적으로 많은 이점을 가지고 있다. 특히 기존의 역모델에 근거한 ILC가 날카롭게 변하는 $\Delta\mathbf{u}_k$ 신호를 발생시키는 현상, 입출력 변수의 차수가 서로 다른 nonsquare MIMO 공정에 적용할 수 없던 현상 등의 문제가 해소될 수 있다. 공정변수에 선형 제약조건이 있는 경우, 해가 (14)식과 같은 단일식으로 주어지지 않지만 QP(quadratic programming) 문제가 되어 수치적으로 신뢰성 있게 구해진다.

Q-ILC는 공정모델 \mathbf{G} 가 100% 상대오차를 가질 때까지도 제어오차를 최소값으로 수렴시킬 수 있는 강인성을 가진다.

Fig. 5에 SISO 공정에 대한 Q-ILC의 성능을 역모델에 근거한 ILC와 비교하여 보였다. 여기서 실제공정과 Q-ILC 설계를 위한 공정모델을 각각

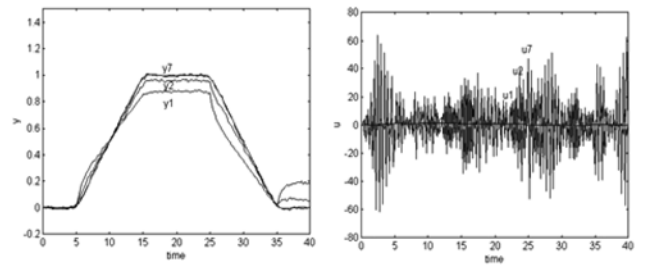
$$\mathbf{G}_p(s) = \frac{0.8}{(5s+1)(3s+1)}, \quad \mathbf{G}_m(s) = \frac{1.2}{(6s+1)(2s+1)} \quad (15)$$

이 각각 샘플링 주기 1로 이산화된 전달함수로 가정하였다. 그리고 공정 출력에는 잡음이 인가되는 것을 가정하였다.

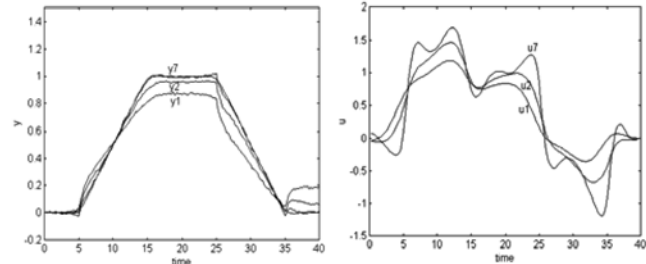
6-3. 실시간 제어기능의 결합

Q-ILC는 실시간 제어(RFC, real-time feedback control) 기능이 결합되어 있다. 실시간 제어기능은 다양한 방법에 의해 결합할 수 있다. 여기서는 먼저 RFC와 ILC기능이 동시에 수행되는 통합 알고리즘을 소개하기로 한다. 이 알고리즘은 개념적으로

$$\mathbf{u}_k(t) = \mathbf{u}_{k-1}(t) + \mathbf{H}_1 \mathbf{e}_k(1:t) + \mathbf{H}_2 \mathbf{e}_{k-1}(1:N) + \dots \quad (16)$$



(a) Performance of inverse model-based ILC (I-ILC)



(b) Performance of Q-ILC

Fig. 5. Comparison of tracking performance of I-ILC and Q-ILC.

의 구조를 갖는다. 여기서 $\mathbf{H}_1 \mathbf{e}_k(1:t)$ 항이 RFC에 해당되며, 나머지 항은 ILC에 해당된다. 이와 같은 제어기 식을 얻는 데에 가장 핵심이 되는 단계는 (6)식을 $\Delta\mathbf{u}_k(t)$ 를 입력변수로 $\mathbf{e}_k(t)$ 를 출력변수로 갖는 상태공간식으로 변형시키는 것이다. 일단 이 모델이 얻어지면 다양한 목적함수에 의한 RFC 결합형 ILC가 얻어진다.

이제 먼저 (6)식의 모델 식에서 $\mathbf{v}(t)$ 가 서로 다른 회분 k 에서는 상관관계를 가지며 다음과 같이 백색잡음의 회분 인덱스에 따른 적분공정으로 표현된다고 가정한다.

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{v}}_k(t) &= \bar{\mathbf{v}}_{k-1}(t) + \mathbf{n}(t) \\ \mathbf{v}_k(t) &= \bar{\mathbf{v}}_k(t) + \hat{\mathbf{v}}(t)\end{aligned}\quad (17)$$

여기서 $\mathbf{n}(t)$ 와 $\hat{\mathbf{v}}(t)$ 는 상호 독립적인 백색잡음이다.

이와 같은 $\mathbf{v}(t)$ 의 분해에 따라 (6)식을 $\mathbf{n}(t)$ 와 $\hat{\mathbf{v}}(t)$ 의 영향을 받는 부분으로 각각 분해하여 기술하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{x}}_k(t+1) &= \mathbf{A}(t)\bar{\mathbf{x}}_k(t) + \mathbf{B}(t)\Delta\mathbf{u}_k(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{n}(t) \\ \bar{\mathbf{y}}_k(t) &= \bar{\mathbf{y}}_{k-1}(t) + \mathbf{C}(t)\bar{\mathbf{x}}_k(t) + \mathbf{n}(t)\end{aligned}\quad (18)$$

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_k(t+1) &= \mathbf{A}(t)\hat{\mathbf{x}}_k(t) + \mathbf{K}(t)\hat{\mathbf{v}}(t) \\ \hat{\mathbf{y}}_k(t) &= \mathbf{C}(t)\hat{\mathbf{x}}_k(t) + \hat{\mathbf{v}}(t)\end{aligned}\quad (19)$$

$$\mathbf{y}_k(t) = \bar{\mathbf{y}}_k(t) + \hat{\mathbf{y}}_k(t) \quad (20)$$

(18)식을 상태공간식으로 바르게 표현하기 위해서는 $\bar{\mathbf{x}}_k(t)$ 에 $\bar{\mathbf{y}}_{k-1}(1)$ 을 $\dots \bar{\mathbf{y}}_{k-1}(N)$ 확장한 새로운 상태를 정의하여야 한다. 그러나 이 경우 상태의 차수가 너무 증가하므로 $\bar{\mathbf{y}}_{k-1}(t)$ 를 $\bar{\mathbf{y}}_{k-1}(t|t)$ 혹은 $\bar{\mathbf{y}}_{k-1|k-1}(t)$ 로 근사한 상태공간식을 생각하기로 한다. 이 근사를 도입하고, (18)식~(20)식을 결합하여 출력을 $\mathbf{e}_k(t)$ 로 갖는 하나의 상태공간식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_k(t+1) \\ \hat{x}_k(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(t) & 0 \\ 0 & A(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_k(t) \\ \hat{x}_k(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B(t) \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u_k(t) + \begin{bmatrix} K(t) & 0 \\ 0 & K(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n(t) \\ \hat{v}(t) \end{bmatrix}$$

$$e_k(t) - \bar{e}_{k-1}(t|t) = [-C(t) \quad -C(t)] \begin{bmatrix} \bar{x}_k(t) \\ \hat{x}_k(t) \end{bmatrix} - n(t) - \hat{v}(t) \quad (21)$$

이식을 편의상 다음과 같이 정의하자.

$$z_k(t+1) = \Phi(t)z_k(t) + \Gamma(t)\Delta u_k(t) + K(t)w(t)$$

$$\zeta_k(t) = e_k(t) - \bar{e}_{k-1}(t|t) = \sum(t)z_k(t) + m(t) \quad (22)$$

이제 RFC가 결합된 알고리즘은 목적함수에 따라 다양하게 언어질 수 있다. 먼저 다음과 같은 LQG 목적함수를 도입할 수 있다.

$$\min_{\Delta u_k \in 2} \frac{1}{2} E \sum_{t=0}^{N-1} \left[\|e_k(t)\|_Q^2 + \|\Delta u_k(t)\|_R^2 + \|\zeta_k(t) + e_{k-1}(t|t)\|_Q^2 + \|\Delta u_k(t)\|_R^2 \right] \quad (23)$$

$\Delta u_k(t)$ 를 제어오차의 함수로 결정하게 하는 것은 회분 인덱스 방향으로 적분제어가 수행되도록, 즉, ILC 동작이 수행되도록 하기 위함이다. 사실 이 최적화를 편리하게 수행하기 위하여 상태공간모델 (22)식도 $\Delta u_k(t)$ 를 입력으로 갖도록 정리한 것이다.

(23)식 제어문제는 표준형 LQG 추적제어문제로 $\Delta u_k(t)$ 의 함수 꼴이 여러 문헌에 이미 잘 제시 되어 있다. 이 제어 알고리즘은 Lee 등[29]이 제시하였으며 BLQG(batch LQG)라 명명하였다.

공정변수에 제약조건이 있는 경우는 LQG 해를 구하는 것이 어려워지며 이때는 다음과 같은 MPC 목적함수를 생각하는 것이 바람직하다.

$$\min_{\Delta u_k \in 2} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p \left[\|e_k(t+k|t)\|_Q^2 + \|\Delta u_k(t+k-1)\|_R^2 + \|\zeta_k(t+k|t) + e_{k-1}(t+k|t+k)\|_Q^2 + \|\Delta u_k(t+k-1)\|_R^2 \right] \quad (24)$$

Subject to linear constraints on process variables

(24)식에서 출력오차의 예측치 $e_k(t+k|t)$ 를 구하기 위한 예측기는 (22)식을 이용하여 구성한다. 제약조건이 있는 경우, (24)식의 해는 QP를 통하여 수치적으로 얻어진다. 상태공간식을 다른 형태로 유도하긴 하였지만 (24)식에 의한 ILC 제어기를 Lee 등[30]은 BMPC(batch MPC)라 명명하였다. 본 논문에서는 QILC, BLQG, BMPC 등 2차 목적함수에 근거한 모든 ILC 방법을 Q-ILC라 통칭하여 부르기로 한다.

이 방법 외에도 $\|e_k(t)\| = \|\zeta_k(t) + e_{k-1}(t|t)\| \rightarrow \min$ 을 만족시키는 $\Delta u_k(t)$ 를 (22)식의 모델식에 근거하여 수행하는 제어기는 모두 RFC가 결합된 ILC가 된다.

6-4. 확장과 변형

6-4-1. 추적제어와 품질제어의 결합

실제 회분공정 운전에서는 2장 3, 4항의 성질이 매우 중요한 문제로 작용한다. 회분 중합반응기에서 단지 온도 제어만을 Q-ILC로 수행한다면 앞에 제시된 알고리즘들이 그대로 사용될 수 있다. 그

러나 최종 제품의 품질제어를 함께 수행하며, 또한 운전 도중 부원료의 투입 등 새로운 조작변수가 도입되고, 새로운 측정치를 관측해야 한다면 알고리즘에 변화를 가하여야 한다.

먼저 최종 제품의 품질은 단지 예측만이 가능하며, 이 예측은 현 시점까지의 측정치와 미래에 가해질 제어입력 값의 함수로 표현할 수 있다. 일단 품질 예측식을 얻으면 이 예측치가 원하는 품질 목표치와 일치하도록 제어입력을 결정하면 된다. (22)식에서 최종제품의 품질이 $\zeta_k(t)$ 의 요소 중 하나가 되도록 정의한다고 하자. 이 품질은 현재 시점의 상태 $z_k(t)$ 와 현 시점 이후 가해질 입력 $\Delta u_k(\tau)$, $t \leq \tau \leq N-1$ 의 함수가 될 것이며 이 관계를 찾아 (21)식의 출력식을 수정하여야 한다. 그 식에 대해 BLQG 든 BMPC 등 적절한 알고리즘을 적용하면 최종품질제어를 동시에 수행하는 Q-ILC가 구성된다.

운전 도중 공정변수의 종류와 상황이 바뀌는 것은 매우 복잡하게 생각될 수 있지만, 사실 시변 상태공간모델로 모두 표현할 수 있다. Chin 등[31]은 Q-ILC가 위에 열거한 문제들을 모두 쉽게 통합할 수 있는 틀을 가지고 있음을 보였으며 수치 공정을 대상으로 그 성능을 시연하였다. 이 연구결과의 일부를 본 논문의 적용 예에서 인용할 것이다.

6-4-2. ILC와 RFC의 분리

회분공정을 (11)식으로 표현하고, 앞에서 소개한 RFC 결합 알고리즘 (16)은 일반적으로

$$u_k = u_{k-1} + H_1 e_k + H_2 \bar{e}_{k-1} \quad (25)$$

와 같이 간략히 표현할 수 있다. 이 알고리즘은 RFC와 ILC를 동시에 수행하지만, 한가지 결함을 가지고 있다. ILC는 u_k 가 공정출력을 원하는 설정치 궤적에 일치시키는 값에 수렴 되도록 동작을 하지만, 실시간에서 예상치 않은 외란이 e_k 에 유입되면 u_k 가 수렴 과정을 벗어나 다른 값으로 교란되는 문제가 발생한다. 이렇게 되면 ILC가 그동안 수렴에 기울인 노고는 헛된 것이 되며 다시 수렴 과정을 반복해야 한다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여 Chin 등[32]은 입력변수 u_k 를 ILC를 위한 부분 \bar{u}_k 와 RFC를 위한 부분 \hat{u}_k 로 $u_k = \bar{u}_k + \hat{u}_k$ 와 같이 분해하여 각각을 독립적으로 계산한 후, 이 둘을 더하여 u_k 를 출력하는 알고리즘을 제안하고 TBC(Two-stage Batch Control)라 명명하였다. 이와 같이 입력을 분해할 때에 (11)식은

$$\begin{aligned} \bar{e}_k &= \bar{e}_{k-1} - G\Delta\bar{u}_k + n \\ e_k &= \bar{e}_k - G\hat{u}_k + \hat{d} \end{aligned} \quad (26)$$

와 같이 표현된다. 여기서 $\Delta\bar{u}_k$ 은 \hat{d} 의 영향을 받지 않은 공정신호만을 이용하여

$$\Delta\bar{u}_k = H_1 \bar{e}_{k-1} \quad (27)$$

같이 계산되고, \bar{u}_k 는

$$\hat{u}_k = H_2 e_k \quad (28)$$

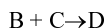
와 같이 실시간 외란 \hat{d} 의 영향을 보상하도록 계산된다. 이렇게 \bar{u}_k 가 실시간 외란의 영향을 받지 않도록함으로써 ILC의 수렴과정

에서 이탈되지 않게 된다. 이후 $u_k = \bar{u}_k + \hat{u}_k$ 로 합하여져 공정에 적용된다. 각 신호의 계산은 다양한 알고리즘으로 수행할 수 있다. \bar{e}_{k-1} 는 직접 측정될 수 없으므로 e_{k-1} 를 Kalman 필터하여 추정한다.

7. Q-ILC 응용 예

7-1. 회분 반응기의 온도와 최종품질제어

Chin 등[31]에 의해서 발표된 것으로, 각 반응물에 대해 1차인



(29)

반응이 진행되는 반회분 반응기를 고려한다. 반응기 운전상황의 개요는 Fig. 6에 보인 것과 같다.

A를 초기에 투입하고 30분 초기가열 후 B를 연속적으로 투입되며, 100분 후 C를 원하는 양(42 mol) 만큼 생산하는 것이 운전의 목적이다. 이 과정에서 A의 농도가 10분 간격으로 측정되며 이 값은 C의 최종 생산량을 추정하는데 사용된다. C의 생산량은 회분 종료 후 계량된다. 제어기는 반응기 자켓 온도와 B 투입량을 조작할 수 있으며, 회분이 반복되며 반응기 온도를 원하는 궤적에 유지시키며 동시에 C 생산량을 목표치에 일치시키는 기능을 가져야 한다.

이 제어기는 품질 예측제어와 온도궤적 제어를 동시에 수행하도록 BMPC를 확장하여 설계되었다.

Fig. 7, 8에 제어 결과를 예시하였다. 인위적으로 상당한 모델오차를 가입하였으며 그럼에도 불구하고 회분수가 증가하며 온도 궤적과 C 생산량이 목표치를 잘 추적하는 것을 볼 수 있다.

그림의 품질제어에서 'Only Tracking Control'은 온도제어만을 수행한(자켓온도 조작에 의해) 경우이며, 'Only Inferential Control'은 품질 추정치만을 이용하여 실시간 제어를 수행한 결과 그리고 'Nominal Case'는 inferential control과 매 회분 종료 후 생산량 계측에 의한 회분단위 피드백제어(ILC)를 수행한 결과를 의미한다.

BMPC를 이용한 회분반응기의 온도 추적제어는 파일럿 규모 반응기에서 실험을 통하여 그 성능이 검증되었다[30].

7-2. RTP에서 웨이퍼 온도균일도 제어

RTP(rapid thermal processor)는 웨이퍼의 표면을 매우 빠른 속도로 가열하는 반도체 가공공정으로 웨이퍼 annealing, 산화막 형성, 절화막 형성 등 다양한 목적으로 사용되는 장비이다.

웨이퍼는 상부에 설치된 많은 수의 tungsten-halogen lamp를 이

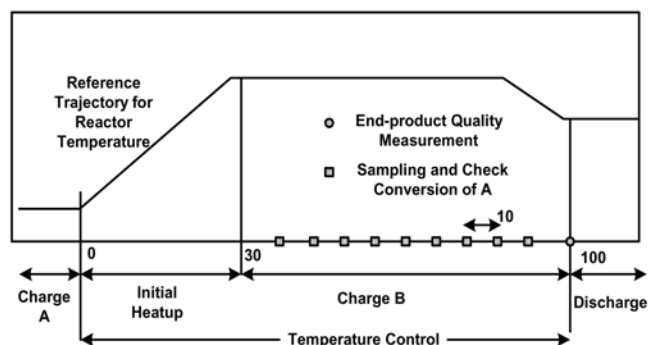


Fig. 6. Operation scenario of the semi-batch reactor example.

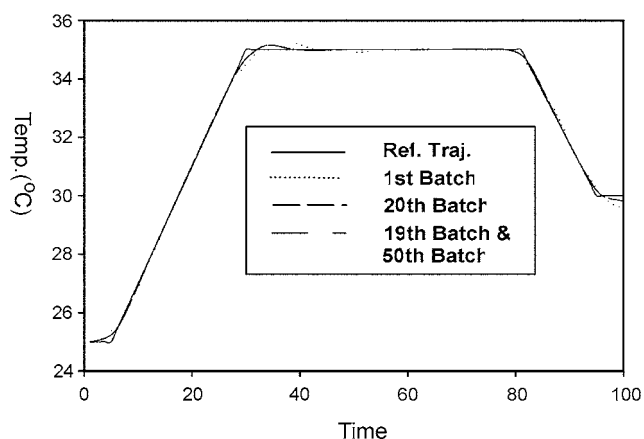


Fig. 7. Batch-wise improvement of temperature profile of the semi-batch reactor example under BMPC with model uncertainty.

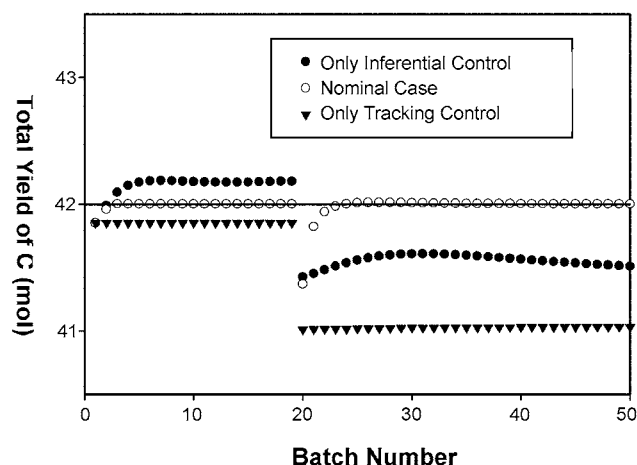


Fig. 8. Batch-wise improvement of the production of C under BMPC with model uncertainty. Nominal case means measurement feedback at the end of each batch plus real-time inferential control.

용하여 가열하며, 이때 웨이퍼 표면온도는 가능한 한 높은 균일도를 유지하며 궤적을 추종해야 한다.

여기에 소개되는 내용은 Cho 등[33]에 의해 수행된 것이다. Fig. 9과 같이 40개의 1 Kw lamp를 가진 8인치 웨이퍼용 RTP에서 실험을 수행하였으며, lamp는 그림과 같이 10개로 grouping하여 조작변수로 사용하였다. 웨이퍼 표면에는 8개의 열전대를 설치하여 이들 온도를 제어하게 하였다. 제어기는 ILC와 RFC의 기능을 분리한 TBC를 사용하였으며, 결국 TBC는 8 × 10 다변수 공정을 제어한 것이 된다.

Fig. 10에 이들 8점 온도의 추적제어가 회분을 반복하며 어떻게 개선되어 가는지를 보여주고 있다.

Fig. 11은 통상적인 방법을 따라 공정출력을 온도로 정의한 $y(t) = T(t)$ 공정모델에 근거하여 TBC를 설계하고 적용한 경우와 복사의 원리를 적용하여 공정출력을 절대온도의 4승으로 정의하여 $y(t) = T^4(t)$ 공정모델을 구성하고 TBC를 설계, 적용한 경우의 결과를 비교한 것이다. 모델의 개선에 의해 온도의 균일도가 한층

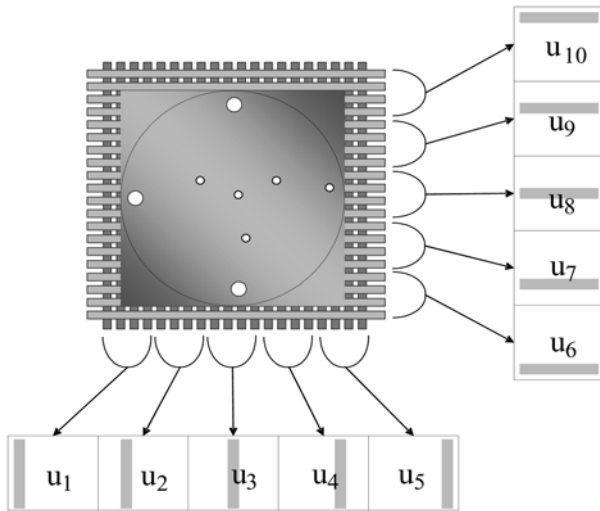


Fig. 9. Thermocouple locations and the grouping of tungsten-halogen lamps for MV use.

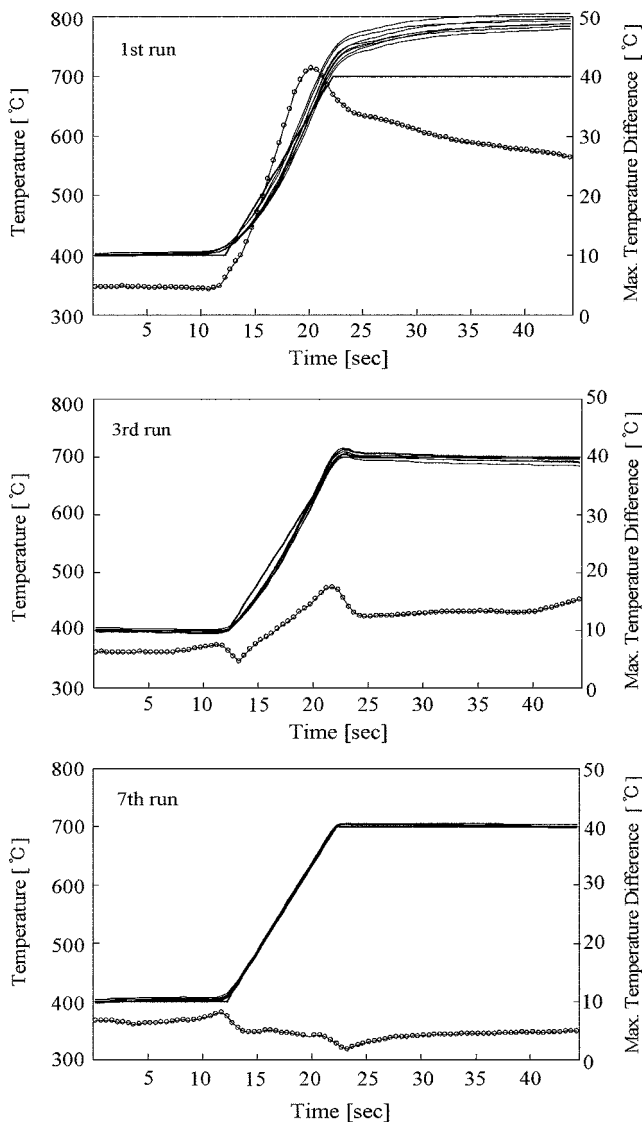


Fig. 10. Progressive improvement of tracking control performance of wafer temperatures under TBC.

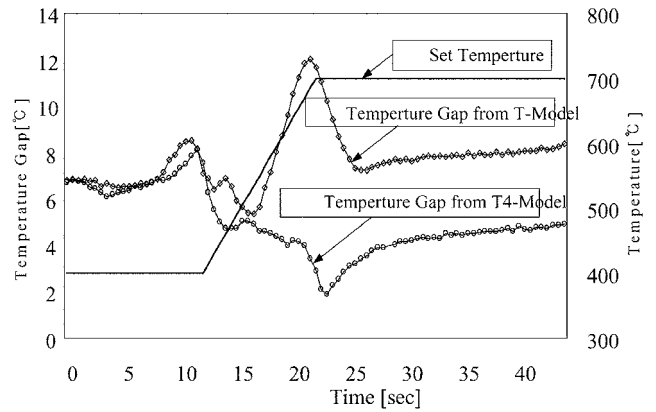


Fig. 11. Performance comparison between T model-based TBC and T4 model-based TBC.

개선된 것을 볼 수 있다. Fig. 10과 11에서 temperature difference, temperature gap은 8지점 측정온도 사이에서 가장 큰 오차를 말한다.

이 제어기법은 국내 기업의 장비에 적용되어 사용되고 있다.

8. 관련된 제어기법들

사실 독립적으로 발전된 그러나 ILC와 관련이 깊은 제어기법들이 여러 형태가 있다. 본 장에서는 이들을 간략히 소개한다. 좀 더 상세한 내용은 Lee와 Lee[26, 34]를 참고하기 바란다.

8-1. 2-D 제어

2-D(2-dimensional) 제어기는 2-D 계를 대상으로 한 제어기이다. 2-D 시스템이란 상태 전이가 두 개의 인덱스 방향으로 일어나는 계를 말한다. 회분공정은 회분과 시간 인덱스 각각의 방향으로 상태 전이가 이루어지므로 2-D 시스템의 한 예가 된다. 그러나 회분공정은 시간 인덱스가 유한하기 때문에 현재 연구되고 있는 2-D 시스템과는 조금 다른 성격을 가지고 있다. 그럼에도, 불구하고 2-D 제어기는 회분공정 제어기로 그대로 사용이 가능하다. 현재까지 2-D 시스템과는 제어가 활발하게 연구되어 온 것은 아니지만 고유한 영역으로서의 특성을 가지고 꾸준히 연구되어 왔다[35-38].

8-2. Run-to-run 제어

Run-to-run(RTR) 제어는 전통적으로 반도체 공정에서 많이 사용되어 온 제어 기법이다. RTR은 사실 ILC의 단순화 형태로, 대상 공정이 동특성을 고려할 필요가(혹은 고려할 수) 없는 정적 공정한 경우, 따라서 공정의 입력과 출력 변수가 시간의 함수가 아닌 상수인 경우에 대한 ILC라 할 수 있다. 반도체 공정의 경우는 실시간에서 웨이퍼의 가공 상태를 측정하는 것이 매우 어렵기 때문에, 운전조건(입력변수)을 고정시키고 가공 후의 상태(출력변수)를 측정하여 RTR로 운전조건을 개선하는 방법을 많이 취한다[26, 34, 39, 40].

RTR 제어는 실험적으로 최적화를 수행하는 EVOP[41] 또한, batch-to-batch 최적화[42, 43]로 본질적으로 거의 동일하다.

8-3. 반복 제어

반복공정은 회분공정이 아닌 연속공정으로 설정치 궤적이 일정한 주기로 반복되는 공정을 의미한다. 반복제어(RC, repetitive control)은 이전 주기의 운전결과를 피드백하여 다음 주기의 제어입력을 계산하는 방법으로 ILC와 개념적으로 유사하며, 또한 ILC의 장점을 동일하게 갖는다[44]. 다만 ILC와 다른 점은 대상공정이 연속공정이므로 상태가 회분 시작점에서 reset 되는 회분공정과 달리, 이전 주기의 상태가 다음 주기의 상태에 영향을 미치며 이전되는 것을 고려해야 한다는 것이다. 선형 반복공정은 lifting을 통해 다음과 같이 모델링 된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1}(0) &= \mathbf{A}\mathbf{x}_k(0) + \mathbf{P}\mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}\mathbf{x}_k(0) + \mathbf{G}\mathbf{u}_k + \mathbf{d}_k \end{aligned} \quad (30)$$

초기시간에서 상태가 reset 된다면($\mathbf{x}_k(0)=0$), 이 모델은 (7)식과 동일해 진다. RC는 이 모델에 (23), (24)식 등의 목적함수를 고려하여 제어기를 설계한다. Lee 등[45]은 MPC 목적함수에 의한 RC를 제안하고 이를 RMPC(Repetitive MPC)라 명명하였다.

9. 결 론

회분공정은 그 특성상 피드백 제어만으로 얻을 수 있는 제어성능은 한계가 있으며, 피드포워드 제어를 동시에 수행할 때 제어성능의 한계를 극복할 수 있다. 그러나 회분공정은 정확한 공정모델을 얻는 것이 쉽지 않기 때문에, 전통적인 피드포워드 제어기 설계의 전제조건을 만족시킬 수 없다는 문제를 가지고 있다. ILC는 이러한 문제점을 근본적으로 해결할 수 있는 기법이며, 지난 수년간에 걸쳐 ILC를 기반으로 한 회분공정의 고급제어기법은 비약적인 발전을 하였다. 이 고급제어방법들은 회분공정만의 독특한 성격과 문제점을 모두 포용하면서도, 연속공정용 MPC의 장점을 모두 포함하는 제어기법들로 이에 대한 주목할 만한 응용 예들도 함께 발표되었다. 본 논문에서는 ILC를 기반으로 한 회분공정제어방법들의 발전을 간략히 살펴보고, 실용적으로 가치가 있는 몇 가지 기법들을 좀 더 상세히 소개하였다.

연속공정과 마찬가지로 회분공정도 고급제어기법에 의해 얻을 수 있는 기회이득이 매우 큼에도 아직까지 적절한 제어기법들이 제시되어 있지 않아 그 응용이 매우 제한적인 이었던 것이 사실이다. 최근 개발된 ILC를 기반으로 한 제어기법들이 회분공정제어의 새로운 장을 열어갈 것을 기대해 본다.

감 사

본 논문은 과학재단 특정기초연구 과제번호 R01-2006-000-11377-0 지원을 통해 수행된 것이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Morari, M. and Lee, J. H., "Model Predictive Control: Past, Present, and Future," *Comp. and Chem. Eng.*, **23**(4-5), 667-682 (1996).
- Qin, S. J. and Badgwell, T. A., "A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology," *Control Eng. Practice*, **11**, 733-764(2003).
- Song, I. and Rhee, H., "Nonlinear Control of Polymerization Reactor by Wiener Predictive Controller based on One-Step Subspace Identification," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **43**, 7261-7274(2004).
- Rantow, F. S., Soroush, M. and Grady, M. C., "Optimal Control of a High-Temperature Semi-Batch Solution Polymerization Reactor," *Proceedings of the 2005ACC*, Portland, USA, 3102, June(2005).
- Sheibat-Othman, N. and Othman, S., "Control of Emulsion Polymerization Reactor," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**, 206-211(2006).
- Cetinkaya, S., Zeybek, Z., Hapoglu, H. and Alpbaz, M., "Optimal Temperature Control in a Batch Polymerization Reactor Using Fuzzy-Relational Models-Dynamics Matrix Control," *Comp. Chem. Eng.*, **30**, 1315-1323(2006).
- Hua, X., Rohani, S. and Jutan, A., "Cascade Closed-Loop Optimization and Control of Batch Reactors," *Chem. Eng. Sci.*, **59**, 5695-5708(2004).
- Arpornwichanop, A., Kittisupakorn, P. and Mujtaba, I. M., "On-line Dynamic Optimization and Control Strategy for Improving the Performance of Batch Reactors," *Chem. Eng. and Processing*, **4**, 101-114(2005).
- Bouhenchir, H., Cabassud, M. and Le Lann, M. V., "Predictive Functional Control for the Temperature Control of a Chemical Batch Reactor," *Comp. Chem. Eng.*, **30**, 1141-1154(2006).
- Pieri, F., Caccavale, F., Iamarino, M. and Tufano, V., "A Controller-Observer Scheme for Adaptive Control of Chemical batch Reactors," *Proceedings of the 2006 ACC*, Minneapolis, USA, 5524, June(2006).
- Ma, D. L., Tafti, L. K. and Braatz, R. D., "Optimal Control and Simulation of Multidimensional Crystallization Processes," *Comp. Chem. Eng.*, **26**, 1103-1116(2002).
- Caliane, B. B. Costa, Aline C. da Costa and Rubens Maciel Filho, "Mathematical Modeling and Optimal Control Strategy Development for an Adipic Acid Crystallization Process," *Chem. Eng. and Processing*, **44**, 737-754(2005).
- Voller, U. and Raisch, J., "Control of Batch Crystallization-A System Inversion Approach," *Chem. Eng. and Processing*, **45**, 874-885(2006).
- Costa, C. B. B., da Costa, A. C. and Filho, R. M., "Evaluation of Optimisation Techniques and Control Variable Formulations for a Batch Cooling Crystallization Process," *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 5312-5322(2005).
- Vu, T. T. L., Durham, R. J., Hourigan, J. A. and Sleight, R. W., "Dynamic Modelling Optimization and Control of Latose Crystallizations: Comparison of Process Alternatives," *Sep. and Purif. Technology*, **48**, 159-166(2006).
- Ronia M. Oisiovici* and Sandra L. Cruz, "Inferential Control of High-Purity Multicomponent Batch Distillation Columns using an Extended Kalman Filter," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40**, 2628-2639 (2002).
- Ulas, S., Diwekar, U. M. and Stadtherr, M. A., "Uncertainties in Parameter Estimation and Optimal Control in Batch Distillation," *Comp. Chem. Eng.*, **29**, 1805-1814(2005).
- Da, L., Kumar, V. G., Tay, A., Al Mamun, A., Weng Khuen Ho, See, A. and Chan, L., "Run-to-run Process Control for Chemical Mechanical Polishing in Semiconductor Manufacturing," *Proceed-*

- ings of the 2002 IEEE Int. Sym. on Intelligent Control, 740-745, Vancouver, Canada(2002).
19. Emami-Naeini, A., Ebert, J. L., Kosut, R. L., de Roover, D. and Ghosal, S., "Model-based Control for Semiconductor and Advanced Materials Processing: an Overview," *Proceedings of the 2004ACC*, 5, 3902-3909, Boston, USA(2004).
 20. Matsumoto, K., Suzuki, K., Kunimatsu, S. and Fujii, T., "Temperature Control of Wafer in Semiconductor Manufacturing Systems by MR-ILQ Design Method," *Proceedings of 2004 IEEE Int. Conf. on Control Appl.*, 2, 1410-1414, Taipei, Taiwan(2004).
 21. Garden, M., "Learning Control of Actuators in Control System," U.S. Patent No. 3,555,252(1971).
 22. Miller, R. C. and Jr. Mallick, G. T., "Method of Controlling an Automatic Machine Tool," U.S. Patent No. 4,088,899(1978).
 23. Uchiyama, M., "Formation of High Speed Motion Pattern of Mechanical Arm by Trial," *Trans. of the Society of Instrum. and Control Eng.*, **19**, 706-712(1978).
 24. Arimoto, S., Kawamura, S. and Miyazaki, F., "Bettering Operation of Robotics by Learning," *J. of Robotic Systems*, **1**(2), 123-140(1984).
 25. Bien, Z. and Huh, K. M., "Higher-Order Iterative Learning Control Algorithm," *IEE Proc. Part D on Control Theory and Appl.*, **136**, 105-112(1989).
 26. Lee, K. S. and Lee, J. H., "Iterative Learning Control-based Batch Process Control Technique for Integrated Control of End Product Properties and Transient Profiles of Process Variables," *J. Process Control*, **13**(7), 607-621(2003).
 27. Ahn, H., Chen, Y. and Moore, K., "Iterative Learning Control: Brief Syrvey and Catgorization 1998-2004," *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, Accepted for Publication(2006).
 28. Lee, J. H., Lee, K. S. and Kim, W. C., "Model-based Iterative Learning Control with a Quadratic Criterion for Time-varying Linear Systems," *Automatica*, **36**(5), 641-657(2000).
 29. Lee, K. S., Lee, J., Chin, I. and Lee, J. H., "Control of Wafer Temperature Uniformity in Rapid Thermal Processing Using an Optimal Iterative Learning Control Technique," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40**(7), 1661-1672(2001).
 30. Lee, K. S., Lee, J. H., Chin, I. and Lee, H. J., "A Model Predictive Control Technique Combined with Iterative Learning for Batch Processes," *AIChE J.*, **45**(10), 2175-2187(1999).
 31. Chin, I. S., Lee, K. S. and Lee, J. H., "A Technique for Integrated Quality Control, Profile Control, and Constraint Handling for Batch Processes," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **39**(3), 693-705(2000).
 32. Chin, I., Qin, S. J., Lee, K. S. and Cho, M., "A Two-Stage ILC Technique Combined with Real-Time Feedback for Independent Disturbance Rejection," *Automatica*, **40**(11), 1913-1920(2004).
 33. Cho, M., Lee, Y., Joo, S. and Lee, K. S., "Semi-empirical Model-based Multivariable Iterative Learning Control of an RTP System," *IEEE Trans. On Semicon. Manuf.*, **18**(3), 430-439(2005).
 34. Lee, J. H. and Lee, K. S., "Iterative Learning Control Applied to Batch Processes: An Overview," accepted for publication in *Control Eng. Practice*(2006).
 35. Roesser, R., "A Discrete State Space Model for Linear Image Processing," *IEEE Trans. A.C.*, **20**, 1-10(1975).
 36. Kaczorek, T., *Two-Dimensional Linear Systems*, Springer-Verlag, Berlin(1985).
 37. Kurek, J. E. and Zaremba, M. B., "Iterative Learning Control Synthesis based on 2-D System Theory," *IEEE Trans. A.C.*, **38**, 121-125(1993).
 38. Shi, J., Gao, F. and Wu, T-J., "From Two-Dimensional Linear Quadratic Optimal Control to Iterative Learning Control. Paper 2. Iterative Learning Control for Batch Processes," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**, 4617-4628(2006).
 39. Chen, Y.-H., Su, A.-J., Shiu, S.-J., Yu, C.-C. and Shen, S.-H., "Batch Sequencing for Run-to-Run Control: Application to Chemical Mechanical Polishing," *Ind. Eng. Chem., Res.*, **44**, 4676-4686(2005).
 40. Firth, S. K., Campbell, W. J., Toprac, A. and Edgar, T. F., "Just-in-time Adaptive Disturbance Estimation for Run-to-Run Control of Semiconductor Processes," *IEEE Trans. On Semicon. Manuf.*, **19**(3), 298-315(2006).
 41. Wilde, D. J. and Beightler, C. S., *Foundations of Optimization*, Prentice-Hall, Englewood-Cliffs(1967).
 42. Zafiriou, E. and Zhu, J. M., "Optimal Control of Semi-Batch Processes in the Presence of Modeling Error," *Proc. of 1990 ACC.*, San Diego, USA, 1644-1649(1990).
 43. Zafiriou, E., Adomaitis, R. A. and Gattu, G., "Approach to Run-to-Run Control for Rapid Thermal Processing," *Proc. of 1995 ACC.*, Seattle, USA, 1286-1288(1995).
 44. Hara, S., Yamamoto, Y., Omata, T. and Nakano, N., "Repetitive Control System: a New Type Servo System for Periodic Exogenous Signals," *IEEE Trans. A.C.*, **33**, 659-668(1998).
 45. Lee, J. H., Natarajan, S. and Lee, K. S., "A Model-based Predictive Control Approach to Repetitive Control of Continuous Processes with Periodic Operations," *J. Process Control*, **11**, 195-207(2001).