

회분 및 반복공정의 고급제어기법

이 광 순, 윤 우 현

서강대학교 화공생명공학과

1. 서 론

1980년 이후 약 15년의 기간은 화학공정 고급제어가 꽃을 피웠던 시기라 할 수 있다. 이 기간 동안 다변수 제어기법인 소위 모델예측제어(MPC, Model-based Predictive Control)가 크게 발전되며 화학공정제어는 기존의 단일 루프 PID 제어의 벽을 깨고 다변수 제어의 세계로 도약한 것이다 [1] 이 시기에 소위 H-infinity 제어, robust 제어 등 새로운 제어개념들이 소개되고 연구되며 제어이론 전반에도 큰 진보가 있었다. 모델인식기법도 예측오차기법이 정립되어 기존의 산재된 방법들을 통합하였으며 부공간법과 같이 다중입출력 상태 공간모델을 직접 찾아주는 방법도 개발되었다. MPC를 중심으로 한 화학공정제어의 발전은 1990년 후반을 들어서며 대체로 정체되는 느낌이며 2000년 이후 새로운 경향이 뚜렷하게 나타나고 있으니 그것은 회분 및 관련공정제어에 대한 관심이라 할 수 있다. 이것은 최근의 산업 파라다임의 변화와 관련이 깊다. 21세기에 들어 그 비중을 더 해가는 산업 분야는 반도체, 기능성 재료, 생명 및 생물, 그리고 정밀화학 등을 들 수 있다. 현재 이들 분야의 생산공정은 대부분 회분 혹은 반회분으로 구성되어 있다.

사실 회분공정의 고급제어는 MPC를 중심으로 한 연속공정에 비하여 그 동안 상대적으로 매우 낙후되어 있었다. 여기에는 여러 이유가 있다. 우선 공정측면에서는 그 동안 세계산업구조가 commodity 생산물을 중심으로 한 대량생산에 치우쳐져 있어 회분공정의 비중이 연속공정에 비하여 상대적으로 낮아 관심이 높지 않았던 점을 들 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 실용적인 회분공정 고급제어기법이 소위 학습제어(ILC, Iterative Learning Control)라는 기법을 중심으로 발전되어 왔으며 [2], 여러 회분공정에 대한 성공적인 응용 사례들이 보고되고 있다. 본 보문에서는 몇 가지 사례를 중심으로 그 내용들을 소개하고자 한다.

2. 회분공정의 특성

제어의 관점에서 회분공정은 연속공정과 매우 다른 여러 성격을 갖는다. 회분공정은 다양한 산업에서 다양한 형태로 응용되고 있지만, 제어의 관점에서 볼 때에 대체로 연속공정과는 다른 다음과 같은 특성을 나타낸다.

1. 연속공정은 제어문제가 외란 극복을 위한 regulation 문제로 대부분 주어지지만, 회분공정의 제어문제는 tracking 문제로 주어진다..
2. 회분공정에서는 비선형성이 강하게 나타난다. 이것은 회분 공정이 회분구간 전체에 걸쳐 비정상상태에서 운전되기 때문에 나타나는 특성이다. 이것은 회분공정에 대한 신뢰성 있는 공정모델을 얻기가 어렵다는 것을 의미한다.
3. 회분공정의 생산물은 회분운전이 끝나는 시점에서만 그 품질을 알 수 있다. 따라서 최종제품의 품질제어를 실시간에서 수행하는 것은 본질적으로 불가능하다.
4. 회분공정은 일정한 회분구간 위에서의 동일한 케이스를 추적하는 운전이 반복되는 경우가 많다.

회분공정의 고급제어기법은 위에 기술한 특성을 수용하며 이를 극복할 수 있는 것이어야 한다. 특히 2 항의 모델 비선형성과 이에 따른 모델오차의 문제는 가장 심각한 것이라 할 수 있다. 그 동안 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 프로그래밍 하지 않고서는 적절한 제어 성능을 얻을 수 없는 경우가 많다.

그림 1은 실제 산업용 회분중합반응기에서의 온도제어 상황을 일부 구간에 대해 보인 것이다. 제어기 조율이 제대로 되어 있지 않아 relay 제어 상황처럼 작동하고 있다. 그림에서 좌측구간과 우측구간이 매우 다른 한계주기(ultimate period)를 보이고 있다. 이것은 이 중합 반응기의 동특성이 이 두 구간에서 매우 다르다는 것을 의미한다. 이 전동특성으로부터 각 구간에서의 한계주기와 한계이득을 구한 후 PID제어기 조율값을 시간에 따라 스케줄링 한 결과, 그림 2와 같은 제어결과를 얻을 수 있었다..

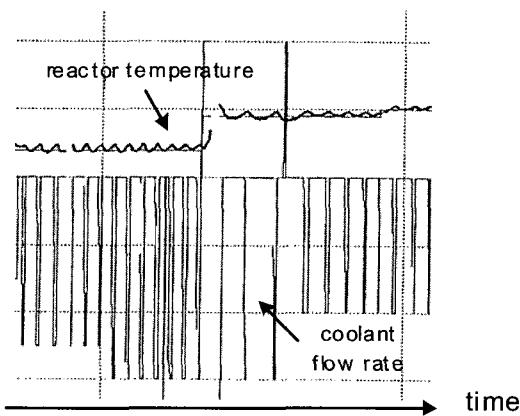


그림 1. 산업용 회분중합반응기에서 나타난 반응온도 진동주기의 시간에 따른 변화.

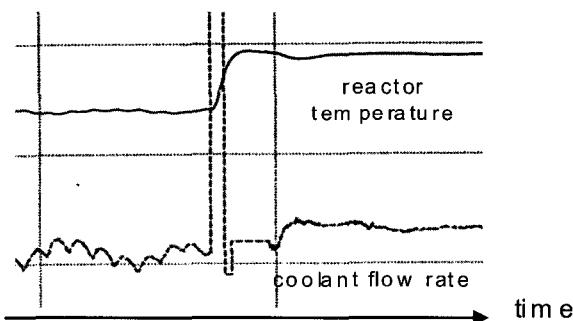


그림 2. 그림 1의 상황을 PID 제어기 파라미터의 스케줄링으로 개선시킨 결과.

그림 1, 2의 반응기에서와 같이 설정치의 변화가 공정의 동특성에 비하여 갖지 않거나 느린 경우는 피드백제어만으로도 충분한 제어성을 얻을 수 있다. 그러나 그렇지 않은 경우, 피드백 제어는 한계를 보일 수 밖에 없다. 피드백 제어는 제

어오차가 감지된 후 이를 보정하기 위한 동작을 취하므로 설정치가 일정한 값을 유지하고 있지 않는 경우는 근본적으로 제어오차를 없앨 수 없다. 따라서 그림 3과 같이 설정치가

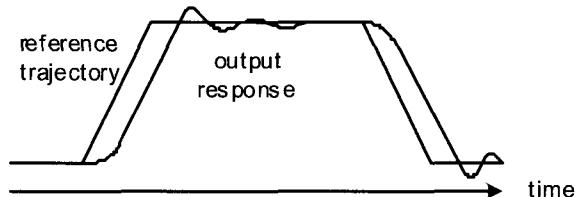


그림 3. 피드백 제어만으로는 시간에 따라 변하는 설정치를 정확히 추적할 수 없다.

ramp로 변하는 경우 제어오차를 발생하는 것을 피할 수 없다. 피드포워드 제어를 이용하면 이런 문제를 크게 개선할 수 있다. 그러나 피드포워드 신호를 계산하기 위해서는 정확한 공정모델을 알아야 하는데 회분공정에서는 이러한 모델을 얻기가 어렵다는 문제가 있다.

4. 기존의 모델기반 회분공정제어 연구

위에서 언급한 문제점에도 불구하고 연속공정에서 많은 성공사례가 있던 모델기반 피드백/피드포워드 제어기법들을 회분공정에도 그대로 응용하려는 시도가 꾸준히 진행되어 왔다. 그러나 이 접근방법에서 제어기의 성능은 모델의 정확성에 의존하게 되므로, 신뢰성 있는 공정 모델을 얻기 위하여 상당한 노력과 비용을 지불할 수 밖에 없으며, 성공적인 적용사례의 경우도 공정의 변화, 원료의 변화 등으로 공정특성이 달라지는 경우는 모델을 새로이 수정해야 하므로 상당한 비용과 노력이 재투입 되어야 한다.

5. 반복학습제어의 기본개념(3)

가장 이상적인 회분공정제어기법은 상당한 모델오차가 존재함에도 불구하고 뛰어난 제어성능을 보이는 것이다. 열핏 모순되어 보이는 이러한 제어요구를 만족시키는 것이 과연 가능할까 하는 의문이 들 수 밖에 없다. 대답은 '가능하다'는 것이며 그 이유를 적분제어기능을 통하여 설명할 수 있다. PID 제어기의 적분모드가 일정한 값을 유지하는 설정치와 외란의 변화에 대해 잔류 제어오차를 없애 주는 기능이 있음은 잘 알려져 있다. 이때 적분시간을 결정하기 위하여 정확한 공정모델을 알 필요는 없다.

이제 만약 회분공정이 일정한 회분구간 동안 운전되며, 추적해야 할 설정치 궤적의 패턴으로 주어지며, 또한 외란도 매 회분 동일한 패턴으로 입력된다면 회분 인덱스에 따른 적분제어를 수행함으로써 잔류제어오차를 없앨 수 있을 것이다. k 회분에서 일 회분 구간 동안의 제어입력과 제어오차 벡터를 각각 \mathbf{u}_k , \mathbf{e}_k 라 한다면 회분 인덱스에 따른 적분제어는

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{H} \sum_{n=0}^k \mathbf{e}_n \Rightarrow \mathbf{u}_k = \mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{H} \mathbf{e}_{k-1} \quad (1)$$

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

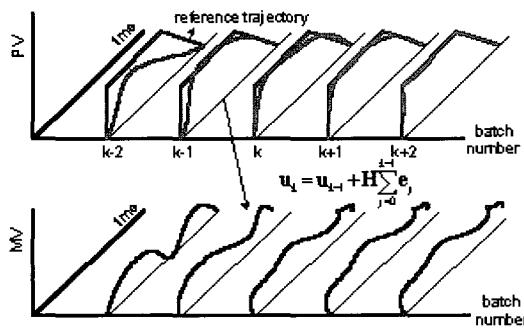


그림 4. 회분단위의 적분제어는 추적오차를 완전히 제거할 수 있다.

그림 4에 회분단위로 피드백 되며 적분동작을 수행하는 제어상황을 보였다. 설정치 궤적의 패턴이 일정할 때, 그리고 동일한 패턴의 외란이 유입될 때에 \mathbf{H} 를 적절히 선택만하면 회분이 반복됨에 따라 제어오차가 계속 줄어 들며 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 부른다. ILC가 실용적 제어기법이 되기 위해서는 많은 개선이 필요하다. 이를 위해 지난 20년 정도의 기간 동안 많은 연구가 진행되었으며 이제는 실용화에 전혀 문제가 없는 수준까지 기법이 발전되었다. 또한 유사분야라 할 수 있는 반복제어(RC,

Repetitive Control)도 더불어 발전하게 되었다. 이제 세 가지 사례를 통해 ILC 기반 회분제어기법이 어떻게 응용될 수 있는지 또한 RC기법이 어떻게 응용될 수 있는지를 소개한다.

6. 반복학습제어의 회분관련공정 응용사례

6.1. 사례1 : 회분 반응기의 온도과 최종품질제어

Chin 등[4]이 연구한 것으로, 각 반응물에 대해 1차인



반응이 진행되는 반회분 반응기에 ILC 기법을 적용한 것이다. 반응기 운전상황의 개요는 그림 5와 같다.

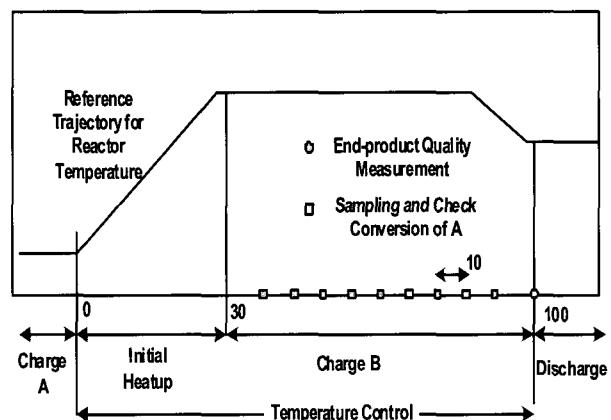


그림 5. 예제 반회분 반응기의 운전개념..

A 를 초기에 투입하고 30분 초기가열 후 B 를 연속적으로 투입되며 100분 후 C 를 원하는 양 (42 mol) 만큼 생산하는 것이 운전의 목적이다. 이 과정에서 A 의 농도가 10분 간격으로 측정되며 이 값은 C 의 최종 생산량을 추정하는데 사용된다. C 의 생산량은 회분 종료 후 계량된다. 제어기는 반응기 자체 온도와 B 투입량을 조작할 수 있으며, 회분이 반복되면 반응기 온도를 원하는 궤적에 유지시키며 동시에 C 생산량을 목표치에 일치시키는 기능을 가져야 한다. 이 모든 기능은 ILC의 틀 안에서 설계가 가능하다.

그림 6, 7에 제어 결과를 예시하였다. 인위적으로 상당한 모델오차를 가입하였으며 그럼에도 불구하고 회분수가 증가하며 온도 궤적과 C 생산량이 목표치를 잘 추적하는 것을 볼 수 있다.

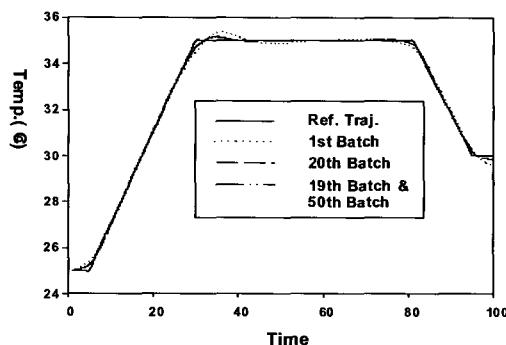


그림 6. 반회분 반응기의 반응온도 추적성능이 모델오차에도 불구하고 회분이 증가하여 개선되고 있다. 20 회분 때 심한 외란이 있었다.

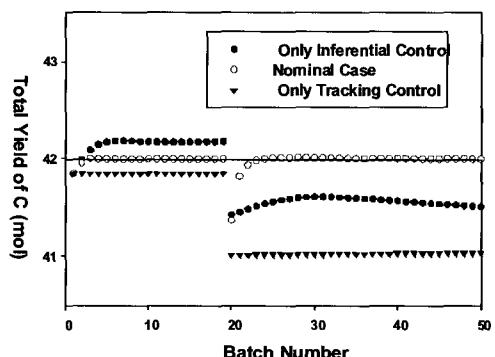


그림 7. 모델오차에도 불구하고 정상적인 ILC제어를 수행하는 경우 C의 생산량이 회분이 증가하며 목표치에 일치된다. 20 회분 때 심한 외란이 있었다..

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 수행 한 결과를 의미한다. 모델오차로 인하여 Only Tracking Control이나 Only Inferential Control 만으로는 C의 생산량이 목표치를 벗어날 수밖에' 없지만 회분종료 후 C 생산량 측정치를 피드백 시키며 tracking control과 inferential control을 함께 수행한 결과 원하는 품질제어 성능이 얻어지는 것을 볼 수 있다.

6.2. 사례 2 : RTP에서 웨이퍼 온도균일도 제어[5]

RTP (Rapid Thermal Processor)는 웨이퍼의 표면을 매우 빠른 속도로 가열하는 반도체 기공장비로 웨이퍼 annealing, 산화막 형성, 질화막 형성 등 다양한 목적에 사용된다.

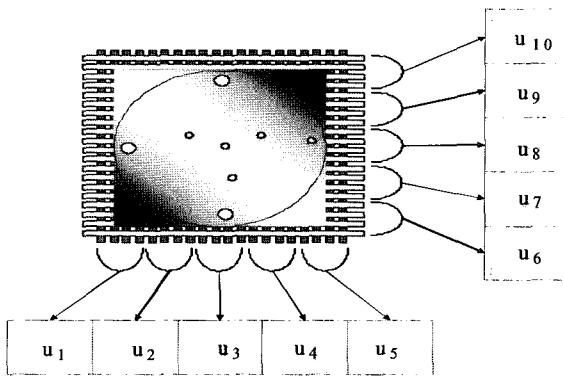


그림 8. 실험용 8인치 RTP에서 웨이퍼 가열용 할로겐 램프의 그룹 및 열전대 설치 위치.

웨이퍼는 상부에 설치된 많은 수의 tungsten-halogen lamp를 이용하여 가열하며, 이때 웨이퍼 표면온도는 가능한 한 높은 균일도를 유지하며 궤적을 추종해야 한다.

여기서 소개되는 내용은 Cho 등[5]에 의해 수행된 것이다. 그림 8과 같이 40 개의 1 Kw lamp를 가진 8 인치 웨이퍼용 RTP에서 실험을 수행하였으며, lamp는 그림과 같이 10개로 grouping 하여 조작변수로 사용하였다. 웨이퍼 표면에는 8개의 열전대를 설치하여 이를 온도를 ILC에 근거한 제어기법으로 8×10 다변수 공정을 제어하였다.

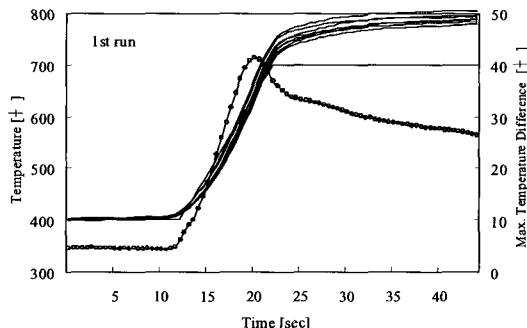
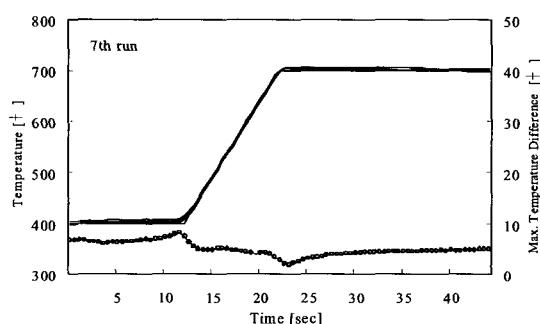


그림 9에 이들 8점 온도의 추적제어가 회분을 반복하며 어떻게 개선되어 가는지를 보여주고 있다.



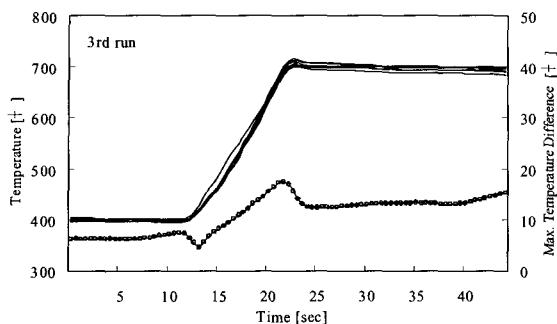


그림 9. 웨이퍼 8 지점의 온도가 회분이 반복되며 높은 정밀도로 시변 설정온도를 추적한다.

그림 10은 공정출력을 온도로 정의한 ($y(t) = T(t)$) 공정 모델에 근거하여 제어기를 설계하고 적용한 경우와 복사의 원리를 적용하여 공정출력을 절대온도의 4승으로 정의하여 공정모델을 구성하고 제어기를 설계, 적용한 경우의 결과를 비교한 것이다. 모델의 개선에 의해 온도의 균일도가 한층 개선된 것을 볼 수 있다. 그림 9, 10에서 temperature difference, temperature gap은 8 지점 측정온도 사이에서 가장 큰 오차를 말한다.

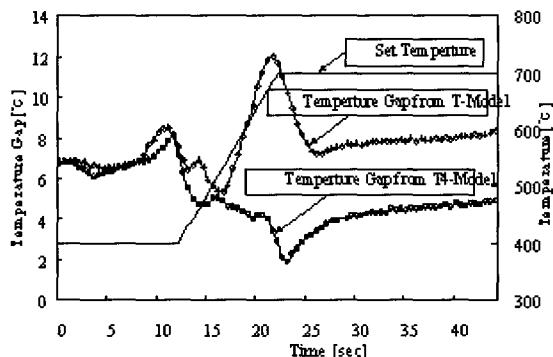


그림 10. 모델개선에 따른 웨이퍼 온도 추적제어 성능의 개선.

6.3. 사례 3 : SMB 공정의 반복제어

최근 의약산업과 바이오 기술 등에서 분리기술의 하나로 중요하게 부각되고 있는 SMB (Simulated Moving Bed)는 크로마토그라프를 이용하여 사실상 연속 분리가 가능하도록 설계한 공정이다. 그림 11이 SMB의 대표적 구성을 보이고 있다.

SMB는 원료 내 성분(A, B)이 desorbent 흐름을 따라 움직이며 흡착제와의 친화력의 차이에 의해 분리가 이루어진다. 포트가 유체흐름과 동일한 방향으로 주기적으로 전환되면 친화력이 큰 성분(A)은 extract 포트로, 친화력이 작은 성분(B)

은 raffinate 포트로 나오게 된다.

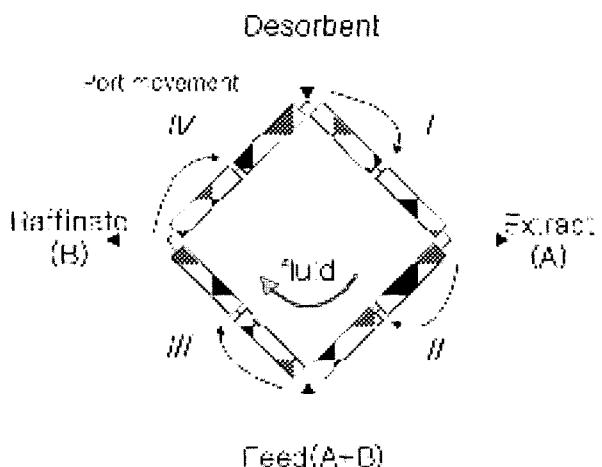


그림 11. 4-zone SMB 시스템.

SMB는 구성하고 있는 각각의 column이 동일한 경우, 일정한 주기로 포트전환이 일어날 때마다 사실상 동일한 운전이 반복되는 싸이클 정상상태에 도달한다. 이는 이전 싸이클 운전이 다음 싸이클에 영향을 주는 반복 공정이며, 반복공정은 회분공정이 아닌 연속공정으로 설정치 궤적이 일정한 주기로 반복되는 공정을 의미한다. SMB 공정의 최적 운전조건을 찾는 일은 주기적인 포트전환과 다양한 외란에 의해 야기된 모델 불확실성 때문에 어려운 일이며 이는 적절한 피드백 컨트롤러의 설계로 극복될 수 있다.

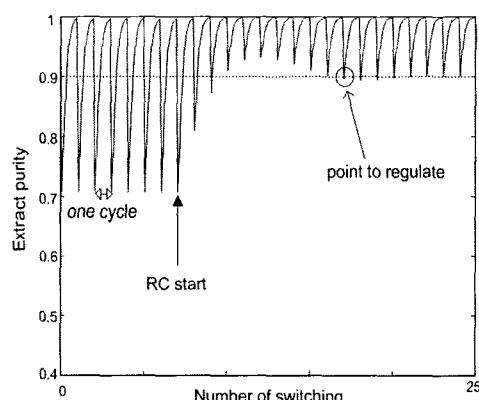


그림 12. 반복제어기에 의한 SMB 성능 개선.

반복제어 (RC, Repetitive Control)는 이전 주기의 운전결과를 피드백 하여 다음 주기의 제어입력을 계산하는 방법으로 ILC와 개념적으로 유사하며 또한 ILC의 장점은 동일하게 갖

는다. 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. 주기적으로 반복되는 SMB 공정에서 이전 싸이클에서의 순도를 반복제어기에 의해 다음 싸이클에서의 제어입력을 결정함으로써 순도를 개선시킬 수 있다. 그림 12는 매 싸이클에서의 가장 낮은 순도를 보이는 시점에서의 값을 피제어변수로 하여, 이 변수값이 반복제어기에 의해 설정치를 쫓아 감을 보이고 있다. 이는 한 싸이클 내의 모든 sampling time에서 순도의 향상을 보장한다.

그림 13은 설계된 반복제어기의 설정치 변화 추적성능을 보인 것이다. 피제어변수로 선택한 매 싸이클에서 가장 낮은 순도를 보이는 값만을 보였다.

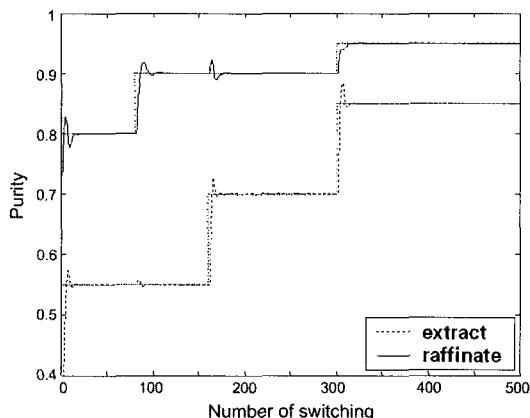


그림 13. SMB 공정에서의 반복제어기에 의한 설정치 추적.

Lee 등[6]은 MPC 목적함수에 의한 반복제어방법을 제안하고 이를 RMPC (Repetitive MPC)라 명명하였고, Kim 등[7]은 비선형 모델을 기반으로 한SMB 공정의 반복제어기를 설계하였다.

9. 결 론

회분공정의 중요성은 산업 파라다임의 변화에 따라 점점 더 커지고 있다. 이에 따라 과거 연속공정의 제어기법을 답습 하던 회분공정 제어기법에도 새로운 변화가 시작되고 있다. 그 중심에 있는 기법이 반복학습제어(ILC)이며 회분공정의 운전이 반복되는 특성을 활용하여 이전의 연속공정제어기법으로 얻을 수 없던 뛰어난 제어성능을 보장한다. 본 보문에서 소개한 근거한 세 가지 응용사례는 ILC 기법의 우수성과 산업적 방법으로서의 가능성을 실증하고 있다.

공정개선의 마지막 단계에서 제어가 시도되는 것이 일반적 상황이다. 그 동안 지속적 장비 개발로 제시된 로드맵을 따라 발전하던 반도체 산업도 최근 장비개발이 한계를 보이기 시작하며 제어에 대한 관심이 높아지고 있다. 한편 Genom project 이후 엄청난 바람이 불고 있는 생명, 생물 관련 산업에서도 일관되고 더 높은 생산성을 유지하기 위해 생물 반응기와 함께 유관 공정인 SMB, 결정화기 등의 제어 요구가 높아지고 있다. 이 모든 공정들이 회분 혹은 유사공정들이며 ILC에 근거한 제어기법들이 이를 공정에 매우 유용하게 활용될 것이라 기대한다.

참고문헌

- [1] Qin, S. J. and Badgwell, T. A., "A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology," *Control Eng. Practice*, 11, 733-764(2003).
- [2] Ahn, H., Chen, Y., and Moore, K., "Iterative Learning Control: Brief Survey and Catgorization 1998-2004," *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, Accepted for Publication (2006).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] Kim, I. S., Lee, K. S., Koo, Y. M., "Nonlinear Model-based Repetitive Control of Simulated Moving Bed Process," *Korean J. Chem. Eng.*, 22(6), 830-838(2005)

..... 저자약력



《이 광 순》 (Kwang Soon Lee)

- 현 서강대학교 화공생명공학과 교수
kslee@sogang.ac.krs
- 1977 서울대 화공과 졸업, 학사
- 1983 KAIST 화공과 졸업, 박사
- 1983-현재 서강대학교 화공생명공학과 교수
- 관심분야 : 연속 및 회분 화학공정의 APC, MPC,

ILC, Identification, 반도체 공정의 제어



《윤 우 현》 (Woohyun Yun)

- 현 서강대학교 화공생명공학과 석사과정
whyun@sogang.ac.kr
- 2006 화공과 졸업, 학사
- 연구분야 : SMB 모델링 및 제어