화학공장의 에너지 절감을 위한 공정분석 및 최적화 기술

포항공대 화학공학과 김 정 환
서울대학교 응용화학부 한 종 훈

본 강좌에서는 최근 중요한 이슈가 되고 있는 화학공장의 에너지 절감을 실현을 위한 공정분석 및 최적화 기술에 관하여 설명하고, 이러한 기술의 현장적용 내용에 대한 소개 및 연구동향 소개를 하고자 한다. 본 강좌를 통해서 공정시스템 분야의 여러 기술을 이용하여 프로세스 개선 및 성과도출을 이루고자 하는 분들에게 도움이 되기를 희망한다.

1. 서론

최근 화학공업계의 화두는 원가절감을 통한 기업경쟁력 확보라 할 수 있다. 특히, 자원고갈과 환경오염에 대한 사회문제로 인해서 보다 적은 에너지를 이용한 공장의 최적운영에 많은 관심이 쏠리고 있다. 물론, 기본적으로 공정의 안전성이나 환경에 관한 문제는 보장이 되어야 하는 것이며, 이런 기본 전제 하에서 에너지 절감을 비롯한 비용절감이 중요한 이슈가 되고 있다. 특히, 에너지 비용은 화학공장의 운영비용 중에서 원료비 다음으로 가장 큰 비중을 차지하고 있어서 에너지 비용의 절감은 매우 중요한 이슈이다. 본 연구회에서 제시하는 방법들은 대부분 기존의 공장에 새로운 추가 설비 투자 없이, 기존공장의 효율을 최대화 시키도록 운전을 함으로써 에너지 절감 목표를 이루도록 한다는데 그 목적이 있다.

본 IP 에서는 대략 다음과 같은 순서로 글을 연재하고자 한다.

- 화학공정의 에너지 절감 Overview
- 데이터 신뢰성 향상 (총계오차판별 및 데이터 보정)
- VOA (Virtual Online Analyzer)
- 모니터링 & Alert
- 시뮬레이션을 통한 최적화
- 에너지 절감 적용사례
- 공정시스템 최신 연구동향

이번 회에서는 석유화학 및 정유공정, 철강공정 등 프로세스 산업에서 개별 기업의 경쟁력 향상을 위한 주요 이슈가 되고 있는 공정분석 및 최적화의 전체적인 모습을 소개하고자 한다.

2. 화학공정 최적화 기술의 발달 배경

먼저, 왜 화학공정 산업에서 최적화 기술 도입이 필요해 졌는가에 대하여 살펴보도록 하자. 대규모 화학공정의 특성은 비선형성과 복잡성이다. 반응기,

분리장치, 유틸리티 설비 등 여러 장치들로 구성된 대규모 화학공장은 매우 많은 운전변수가 존재하며 각 변수간 복잡한 상관관계가 존재한다. 만약 최적으로 운전하고자 하는 대상시스템이 매우 단순하고 고려해야 할 운전변수가 몇 개 되지 않으며 대상시스템의 거동에 대해서도 잘 알고 있다면 최적화를 굳이 도입할 필요도 없다. 그러나, 화학공정은 매우 복잡한 비선형 시스템이고 경영환경이 지속적인 변화 (예: 원료 및 에너지원 단가 등)하기 때문에 이러한 많은 변수를 엔지니어 혹은 운전원이 모두 고려하여 짧은 시간 내에 최적의 운전조건을 찾아내어 운전하는 것이 불가능하기 때문이다.

또 한 가지 이슈는 투자대비 효과의 문제인데, 일반적으로 화학공장의 경우 운전비용이 매우 크기 때문에 몇 % 정도의 효과만 보아도 그 절감액이 최적화 시스템을 도입하기 위해 투입되는 비용 (공장정보시스템 (PIS: Plant Information System)의 도입이나 프로젝트 투입인력 비용, 최적화 서버 등 관련설비의 도입 비용 등) 보다 일반적으로 더 크기 때문이다.

정유 및 석유화학 공정을 중심으로 70 년대 말부터 실시되어온 실시간 최적화 기술은 설치 가격에 비해 신뢰도가 낮고 대부분이 조업자들의 경험에 의존하여 가능성을 제시하는 수준으로 이용되거나 많은 경우 고급 제어 프로젝트에서 제외되었으나 최근에는 화학 공장에서의 CIM 기술 발전, 컴퓨터의 처리속도 향상 등에 따라 관련 기술들이 체계화되면서 규모가 큰 공장들에 적용되어 좋은 성과를 내고 있다. 또한 이와 관련한 기술 적용을 위한 여러 상용 패키지들이 출현하고 있어 많은 적용 사례들이 발표되고 있다.

이러한 실시간 최적화 기술의 도입 배경을 살펴보면 하드웨어와 소프트웨어 등 컴퓨터의 발전을 들 수 있다. 분산제어시스템(DCS) 설치, 공정 컴퓨터 도입과 최적 운전 소프트웨어 개발, DCS 와 관련 컴퓨터 연결을 위한 LAN 의 설치 등의 바탕 위에 선형 계획법(LP)을 비롯해 비선형 계획법(NLP)과 혼합정수비선형 계획법(MINLP)등 수리 계획법이 복잡한 공정에도 적용되어 최적해를 찾는데 좋은 결과를 내고 있다. 최근에는 네트웍과 웹기술의 발전, 무선통신기술의 발전으로 공장의 주요 운전정보를 PDA 를 통해서 볼 수 있게 되었으며 공장에 중요한 일이 발생하게 되면 어디에 있던지 이러한 사실을 알 수 있게 되었으며, 공장운전 정보를 웹을 통하여도 파악할 수 있게 되는 등 많은 발전이 이루어지고 있다.

3. 화학공정 최적화 구성요소

화학공정 최적화를 구성하는 주요 요소와 관련기술을 표 1 에 나타내었다. 최적화를 수행하기 위해서는 대상 프로세스의 거동에 대한 분석이 필수적이기 때문에 모델링 작업을 하게 된다. 즉, 프로세스에 어떤 입력(input)을 주어야 원하는 출력(output, 예를 들면 에너지 절감이나 비용감소 등)을 얻어낼 수 있는지를 알기 위해서는 대상시스템의 특성을 대변하는 모델을 개발하는 것이 가장 중요한 작업이다. 대상시스템에 대한 모델링은 대상시스템의 입력 및 출력 데이터를 분석하여 데이터에 기반을 둔 모델을 만들 수도 있고 대상시스템에 대하여

파악하고 있는 물리,화학적 성질을 이용하여 수식모델을 만드는 것이 가능하다. 대상시스템의 특성에 따라서 적당한 방식으로 접근하게 된다. 예를 들어, 대상시스템의 거동을 충분히 알고 있는 경우에는 수식모델에 기반한 접근법을 쓰는 것이 매우 좋지만, 그렇지 못할 경우에는 데이터에 기반을 둔 모델을 만들게 된다. 어떤 경우이건 간에 데이터의 신뢰성 확보는 매우 중요한 작업이 된다. 그러나, 실제 현장에서는 측정장치가 부족하고 오차가 존재하기 때문에 이를 해결하는 작업들이 필요하게 된다. 또한, 데이터의 신뢰성 향상은 공장의 Performance 를 평가하는 데 있어서도 데이터가 부정확하면 제대로 된 결과를 얻을 수 없기 때문에 또한 매우 중요하다. 또 한 가지 중요한 점은, 대상시스템에 대한 분석을 통해서 모델을 개발했다고 해도 공장의 주요 장치의 효율변화 등 공장은 계속 변하기 때문에 모델의 성능은 계속 떨어지게 마련이다. 이를 극복하기 위해서 모델의 업데이트 또한 매우 중요한 사항이 된다. 개별 항목에 대한 자세한 논의는 향후 제공되는 자료에서 보다 자세하게 다루고자 한다.

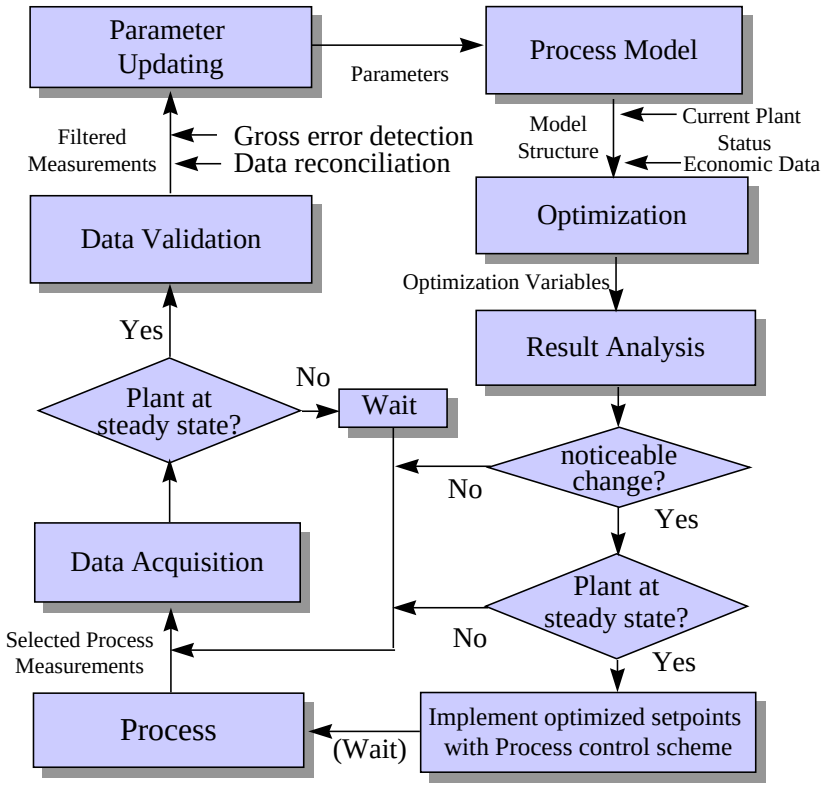
<표 1> 화학공정 최적화 주요 구성요소 및 관련기술

최적화 구성요소	관련기술
데이터 신뢰성 확보	➢ 총계오차 판별 ➢ 데이터 보정
공정 Performance 평가/관리	➢ 모니터링 ➢ VOA (Virtual Online Analyzer) ➢ Alert & Alarm
모델 개발	➢ 다변량 데이터 분석 ➢ 실험계획 ➢ 시뮬레이션 ➢ 모델링
최적화 수행	➢ 최적화 엔진 (Search Algorithm 개발) ➢ 프로세스 컨트롤 ➢ 최적화 시스템 개발
유지관리	➢ 결과분석 ➢ 모델 Update

4. 실시간 최적화 수행 과정

일반적인 대형화학공정의 실시간 최적화는 그림 1 과 같은 단계를 거친다. 즉, 프로세스로부터 선택된 데이터를 받아들여 데이터 수집 및 공정이 정상 상태임을 판별하여 정상상태가 아닐 경우에는 정상상태에 도달할 때 까지 기다리고, 정상상태가 확인되면 총괄 오차 제거나 데이터 보정 등과 같은 데이터 검증의 단계를 거치게 된다. 만약 정상상태가 아닌 상태에서 최적화를 수행하고 이 결과를 프로세스에 적용하게 된다면 원하는 결과를 결과를 얻을 수 없다. 왜냐하면, 프로세스 모델은 정상상태의 프로세스 거동을 묘사한 모델을 이용하고 있기

때문에 프로세스 모델이 유효한 경우는 프로세스가 정상상태일 때이기 때문이다. 정상상태가 확인되면 최적화 엔진을 가동하여 최적화 계산을 하게 된다. 최적화에 의해 결과가 나오더라도 계산후의 공정이 정상상태에 있지 않으면 다시 데이터 수집 단계로부터 실시간 최적화 루프는 재시작 된다. 공정이 정상상태에 있으면 결과값을 컨트롤에 적용하고 다시 몇 시간 정도 기다려 공정의 변화가 있을 경우에 다시 실시간 최적화를 수행한다. 이와 같이 실시간 최적화는 일련의 세부 단계를 순서대로 그리고 주기적으로 반복하는 시스템을 구성하고 있음을 알 수 있다.



<그림 1> 실시간 최적화 수행과정

그렇다면 언제 최적화를 시작하고 어느 정도의 주기로 수행하는가? 이를 위해서 필요한 것이 프로세스의 Performance 에 대한 모니터링이다. 각 프로세스마다 중요하게 관리하는 지표 (KPI: Key Performance Index)가 있으므로 이 지표가 일정기준 이하로 떨어지게 되면 프로세스에 적당한 입력을 주어 프로세스를 원하는 방향으로 움직여야 하는 것이다. 최적화의 수행주기는 대상 프로세스가 운전영역 변동 시 정상상태에 도달하는 데 걸리는 안정화 시간보다는 길어야 하며, 운전조건 및 경영환경의 변화보다는 짧은 주기보다는 짧도록 해야 한다. 그래야, 프로세스의 안정성을 유지하면서 운전상황의 변화를 시의적절하게 반영한 최적화 수행이 가능하다.

5. 실시간 최적화 적용사례 및 효과

정유 및 화학 공정에서 적용되는 실시간 최적화 분야를 살펴보면 단위 공정으로부터 공장 스케일까지 다양하다. 지금까지 적용된 구체적인 예는 표 2 와 같으며, 에틸렌 공장과 같이 여러 개의 반응기, 증류탑, 냉각 시스템과 열원 등을 갖고 있는 일반적으로 복잡한 공정의 경우 등에 많이 적용되어 많은 성과를 보고 있다.

<표 2> 실시간 최적화 적용 사례

YEAR	***APPLICATION***	***USER***	***PROFIT***
1983	Ethylene Plant	Shell Oil	3-5 %
1987	Power Station	Wilton	2-6%
1990	Refinery	Texaco	4 M$/yr
1990	Gas Plant	Amaco Painter	4 M$/yr
1990	Crude unit	Star Enterprise	3 M$/yr
1990	Ethylene Plant	Chevron USA	5-10 %
1991	Ethylene Plant	OMV Deutschland	1-3 %
1992	Benzene Plant	Sow Benelux N.V.	4%
1993	Sulfuric Acid Plant	Monsanto	17%(predicted)
1995	Hydrocracker	SUNOCO CANADA	1 M$/yr
1999	Cracker plant	Huntsman	5% output Increase
2002	Utility Plants	DSM	Millions of Euro
2002	Petrochemical plants	SK Corporation	31.5 M$/yr

본 회에서는 화학공정의 최적화에 대한 전체적인 Overview 를 살펴보았다. 다음 회에서는 최적화 수행에 있어 가장 기본이 되는 과정인 데이터 신뢰성 확보를 위한 총계오차판별 및 데이터 보정에 관하여 알아보도록 하겠다.