

RTO: Real-Time Optimization (1/2)

포항공대 화학공학과 김정환
서울대학교 응용화학부 한종훈

앞으로 2회에 걸쳐서 실시간 최적화 (RTO)에 관하여 살펴보도록 하겠다. 본 회에서는 RTO의 개념 및 모델링 기법에 관하여 살펴보도록 하겠다.

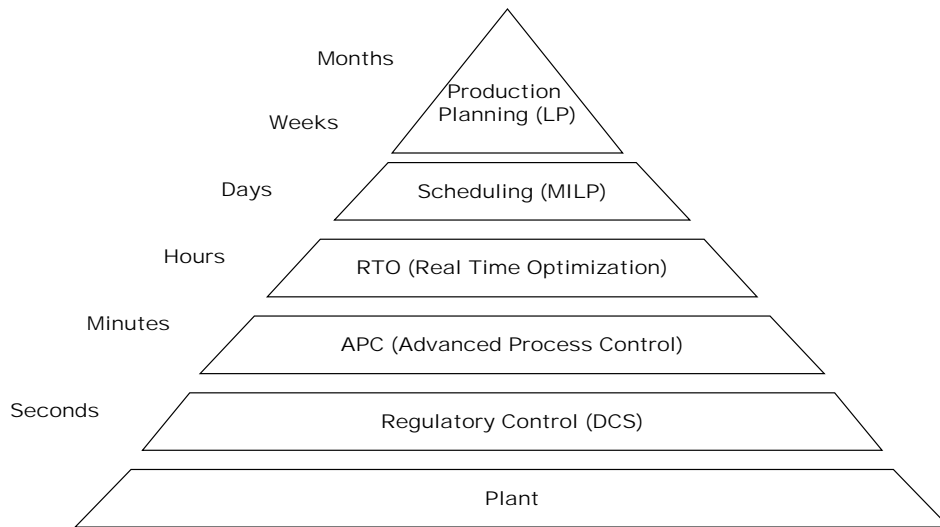
1) RTO의 개념

생산계획을 포함하는 상위단계, RTO, 하위 단계인 컨트롤 등으로 이루어지는 공정최적화 Hierarchy는 <그림 1>과 같다. 공장전체에 대한 생산계획은 일반적으로 그 범위가 광범위하여 많은 변수가 필요하고 수요예측 정보 등 불확실한 변수를 많이 포함하고 있기 때문에 복잡하고 정교한 수식보다는 간단하고 단순한 수식이 유리하여 일반적으로 선형계획(LP)을 이용한다. 그 하위단계인 스케줄링 단계는 상위단계의 생산계획을 바탕으로 설비에 대한 운영계획을 수립하게 되며, 주로 LP를 사용하지만 경우에 따라서 간단한 비선형모델을 포함하기도 한다. 실시간 최적화 단계는 시간상으로 보았을 때 수 시간에 한 번 정도의 주기로 수행하며 대상시스템에 대한 Rigorous한 모델을 이용한다. 실시간 최적화 결과는 하위 단계인 컨트롤 단계로 전달되어 공정에 적용되는 계층적 구조로 이루어져 있다.

실시간 최적화에서 ‘실시간’이란 최적화를 위한 계산시간이 최적화 결과를 대상시스템에 적용하는데 걸리는 시간보다 더 짧은 경우를 말한다. 화학공장의 경우 조업의 안정성을 위하여 조업을 적어도 수 시간 이상 지속하기 때문에, 최적화 연산시간은 비록 길어야 수 분 정도에 끝나지만 (일반적인 사이즈의 문제일 경우), 실제 최적화 결과를 적용하는 빈도수는 하루에 수 회 정도가 된다.

실시간 최적화는 일반적으로 데이터 수집, 데이터보정, 정상상태 판별, 최적화 연산, 최적화 결과의 적용 및 모델 업데이트의 순서로 이루어진다. 최적화

연산에서 가장 중요한 부분은 최적화 모델을 구성하는 부분이며, 모델링 기법에는 수학적 모델링, 데이터기반 모델링 등이 있다. 데이터 기반 모델링의 대표적인 예로서 신경망 모델이 있으며, 데이터 기반 모델은 모델구성을 위하여 사용한 데이터 영역 내에서 모델 정확도가 높은 반면, 그 이외의 영역에 대하여는 정확성이 많이 떨어진다는 단점이 있다. 반면, 수학적 모델링은 대상시스템을 정확히 묘사할 수 있는 수식이 있을 경우 적용하면 매우 좋은 방법이지만, 대상시스템의 거동을 수식으로 표현하기가 힘들고 잘 모르는 경우에는 쓰기가 어렵다. 대상시스템 및 상황에 따라 다르지만 일반적으로는 수식기반의 모델을 이용한 최적화를 많이 수행하고 있으며 최근에는 데이터기반 모델링도 많이 사용하는 추세이다.



<그림 1> 공정최적화 구조 Hierarchy

2) 모델링 기법

최적화에서 가장 중요한 부분은 모델링 부분이기 때문에 대상 시스템을 모델링하기 위한 여러 모델링 기법들이 있으며, 각 모델들에 관하여 간략히 설명하면 다음과 같다.

1) Constrained vs. Unconstrained

제약조건이 없는 것이 Unconstrained optimization problem 이고, 제약조건이 있는 것은 Constrained optimization problem 이다. 일반적으로는, 제약조건이 당연히 존재하기 때문에 constrained type 의 최적화 문제가 많다. 그러나, Constrained optimization 의 형태로 구성할 경우, 잘 풀지 못하는 문제를 penalty function 의 개념을 도입해서 unconstrained optimization 의 문제를 풀으로써 최적값을 보다 효율적으로 찾을 수 있기 때문에, unconstrained optimization problem 역시 많이 쓰이고 있다. (참고: penalty function: 제약조건을 어기게 되는 경우, 이것에 대한 페널티를 부과하여 목적함수에 추가하게 되면, 비용을 최소화하고자 하므로, 최적해는 페널티가 부과되는 제약조건을 만족시키는 방향으로 정하여 짐으로써 페널티를 최소화시키도록 한다.)

2) Continuous variable optimization vs. Discrete variables optimization

목적함수 및 제약조건 등 최적화 모델을 구성하고 있는 변수들이 모두 연속변수들로 구성되어 있는 경우가 Continuous variable optimization 이며, 최적화 모델에 정수변수나 이진변수 등의 변수가 포함되어 있을 경우, discrete variable optimization 이 된다. 연속변수로 이루어진 최적화 모델보다, 정수변수 및 이진변수로 이루어진 최적화가 훨씬 풀기 어려우며, discrete variable 의 개수가 증가함에 따라 연산시간이 exponentially 증가한다.

3) Linear Programming (LP) vs. Nonlinear Programming (NLP)

최적화 모델을 구성하고 있는 모든 함수들이 선형인 경우가 LP, 하나의 함수라도 (목적함수건 제약조건 중의 일부이건) 비선형인 경우 NLP 가 된다. LP 의 경우, Global optimum(전역해)이 보장되지만, NLP 의 경우, Local optimum(지역해)을 찾게 된다. 비선형성이 심하게 나타나며, 간단한 2 차식 등으로 표현이 가능한 영역에서는 비선형 최적화 모델을 쓰는 것이 해의 정확도를 향상시키며 연산시간도 많이 걸리지 않으므로 유리하다.

4) Static vs. dynamic models

Static 모델과 dynamic 모델의 차이는 시간이라는 변수의 포함 여부이다. 즉, 하나의 정상상태만을 나타내고 있는 것이 static model 이며, 여러 주기를 포함하는 경우, 즉, 시간에 따른 변화를 나타내고 있는 모델이 dynamic model 이다. 화학공장의 실시간 최적화 중 유틸리티 시스템에 대한 부하배분최적화의 경우는 일정한 시점에서 프로세스가 정상상태에 도달했을 때 최적화를 수행하게 되므로, static model 을 사용하게 된다. 반면에, 고분자 반응기의 온도제어를 통한 품질제어를 할 경우, 반응시간 각 시점에서의 최적화값을 결정하게 되므로 dynamic model 을 이용한 dynamic optimization 을 수행하게 된다.

5) Single objective vs. Multi-objective

목적함수가 하나인 경우가 single objective problem 이며, 목적함수가 여러 개인 경우가 multi-objective problem 이 된다. 예를 들어, 화학공장의 최적화를 수행하는데, 연간 운전비용의 최소화라는 하나의 목적함수만으로 모델링을 할 수도 있고 (Single objective), 운전비용을 최소화 하면서 동시에 이산화탄소 배출량을 최소화하고자 한다면 multi-objective problem 이 된다. Multi-objective problem 의 경우는, 두 개의 목적함수를 모두 최적의 값으로 갖도록 하기 위해서 optimal trade off 를 찾게 된다. 예를 들면, 조업비용을 절감하기 위해서는 이산화탄소의 배출을 어느 정도 허용하게 되며, 두 가지를 모두 고려했을 때 최적의 해를 찾게 된다. Multi-objective 형태의 문제를 구성할 때는, 각 objective function 의 dimension 을 통일하게 되는데, 일반적으로는 비용으로 통일한다.

6) Stochastic vs. Deterministic model

최적화 모델을 구성하고 있는 모든 파라미터들이 고정되어 있다고 보는 것이 deterministic optimization 이며, 각 파라미터들은 고정된 값이 아닌 확률분포를 갖는다고 가정하는 것이 stochastic model 이다. Planning 의 경우는 특히나 미래의 제품수요나 원료단가 등에 많은 불확실성이 존재한다. 이는 시장상황에 따라 매우 가변적인 것이므로, 이를 확정적인(deterministic) 값으로 고정하여 문제를 풀기보다는 확률의 개념을 도입하여 모델링을 하는 것이 stochastic

optimization 이다. Stochastic modeling 의 경우, 사실은 상당히 이론적인 측면이 강한데 그 이유는 불확실하다고 믿는 각 파라미터들에 대한 정확한 확률분포를 예측하는 것 역시 많은 불확실성을 내포하고 있으며, 그 불확실성을 줄이기 위해서 많은 시나리오를 가정하게 되면 그 만큼 연산시간이 늘어나서 문제를 풀기가 어려워진다.

3) 최적화 문제 구성

일반적인 실시간 최적화 시스템의 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Maximize} && P(X) \\ & \text{Subject to} && h(x) = 0 \\ & && g(X) \leq 0 \\ & && X_{\text{lower}} \leq X \leq X_{\text{upper}} \end{aligned}$$

여기서 $P(X)$ 는 공정으로부터 얻게 되는 이익이며 등식 제약 조건인 $h(X)$ 는 수식 기반 모델로 물질 수지식, 에너지 수지식, 열역학적 관계식, 물리적 제약식과 그들의 도함수까지 수많은 모델들을 포함한다. 부등식 제약 조건인 $g(x)$ 는 공정의 제약 조건식, 원료나 에너지 사용 등의 제약 조건 등을 나타낸다.

다음 회에서는 RTO 프로젝트의 수행과정 및 각 단계별 유의해야 할 점 등에 관하여 살펴보도록 하겠다.

References

- 1) 김정환, 한중훈, “대형화학공장의 실시간 최적화 기술동향”, 대한전자공학회, Vol.26, No.3, pp.286-293,1999.
- 2) 이성제, 한중훈: ICASE Magazine, 3(3), 13, 1997.
- 3) Marlin, T. E. and Andrew N. hrymak: Chemical Process Control - V, Jan, 1996.