

화학 공정의 제어성의 구조적 분석에 관한 연구

이 병우, 김 윤식, 윤 인섭
서울대학교 공과대학 응용화학부

A Study on the Structural Analysis of Controllability in Chemical Processes

Byungwoo Lee, Yoonsik Kim, and En Sup Yoon
School of Chemical Engineering, Seoul National University

1. 서론

공정은 수요, 운전 조건, 원료 등의 변화에 따라서 경제적이며 동시에 안전하게 운전하도록 설계되어야 한다. 이러한 변화 사항은 공정의 운전 중에는 regulatory control 또는 supervisory control에 의해서 제어된다. 그러나 제어 시스템의 성능은 제어기뿐만 아니라 공정 자체에도 의존하게 된다. 즉, 설계 단계에서 제어에 필요한 조건이 만족되지 않은 상태에서 제한된 제어기의 성능으로는 원하는 제어 능력을 가진다고 확신하기 어렵다.

제어 능력은 두 종류로 구별할 수 있다. 하나는 유연성(flexibility)으로서, 이것은 정상 상태(steady state)에서 새로운 상황을 처리할 수 있는 능력이다. 다른 하나는 제어성(controllability)으로서, 조업 상태간의 동적인 상태 전환을 허용 가능한 방법으로 할 수 있는 능력이다. 제어성(Controllability)은 공정이 다양한 운전 조건 사이를 허용 가능한 거동을 통하여 동적으로 전이할 수 있는 능력을 뜻한다. 정의에 따르면, 이 제어성은 제어기에 상관없이 공정 자체에 따라 결정된다. 제어성과 관련된 단어로는 전환성(switchability)라는 용어가 있으며, 이것은 원하는 두 상태 사이의 이동이 얼마나 용이한지를 나타낸다.

화학 공정은 그 특성상 비선형성이 크고, 다변수 시스템이며, 그 구조가 복잡하다. 그러나 현재까지 개발된 방법들은 제어성의 평가 방법이 복잡하고, 평가에 필요한 정보가 설계의 초기 단계에서는 알 수 없는 경우가 많다. 이런 이유로 해서 제어성 평가가 전체적인 공정의 설계 과정에서 적절하게 이용되지 못하고 있다. 따라서 공정 및 공장의 설계시에 제어성의 평가 및 향상을 도입하기 위해서는 이를 위한 절차에 대한 연구가 필요하다.

2. 현재 사용되고 있는 제어성 평가 방법

2.1. 정상 상태에 기반한 제어성 평가

Fisher 등은 설계 단계의 초기 단계에서 공정의 제어성을 평가하는 체계적인 방법을 연구하였다. 이 연구에서는 대안을 선택하기 위해서 경제적인 penalty를 준다. 또, 제어성을 향상시키는 방안으로는 조작 변수를 추가하기 위해서 공정을 개선하거나, 제약 조건이 공정에서 발생하는 외란에 의해서 적용되지 않도록 장치를 overdesign하거나, 중요도가 가장 낮은 변수의 최적화를 하지 않는 방법을 제안했다. 이들의 제어성 분석의 목적은 설계 대안 중에서 가장 경제적 penalty가 낮은 것을 결정하는 것이다.

열 교환기 네트워크에 대한 제어성 문제는 Marsell 등에 의해서 처음으로 정의되었다. 여기에서는 스트림의 유량과 온도 변화를 최대 에너지 효율을 가지도록 처리하는 설계 절차가 제안되

었다. Linhoff와 Kotjabasakis는 “downstream path”와 “sensitivity table”의 결합을 통해 제어성과 경제성 사이에서의 tradeoff를 보다 효율적으로 처리했다. Georgiou와 Floudas는 capital cost를 낮추면서 외란을 완전히 제거할 수 있는 열 교환망 합성에서 superstructure를 이용하는 접근 방식을 통한 절차를 제안하였다. 외란을 완전히 제거할 수 없는 경우에는 외란의 전파를 최소화한다. Shinnar는 제어성의 개념에 모델의 부정확성과 많은 중요한 공정 변수들이 실제로는 측정되지 않을 수 있다는 점을 고려하였다.

2.2. 선형 동적 모델에 기반한 제어성 평가

제어성 평가의 목적은 여러 종류의 설계에서 최적의 제어기 parameter와 도달한 최적 성능을 비교하기 위해서 제어성의 척도를 찾는 것이다. 이를 위해서는 공정의 선형 동적 모델, 원하는 closed-loop performance에 관련된 몇 가지 성능 목표, 제어기 구조의 몇 가지 조건이 필요하다. 최적 제어에서 전통적으로 사용되어 온 목적 함수는 integral square error(ISE)다. ISE 자체는 실제 그다지 중요하게 사용되지 않는다. Lee 등은 integral square error, 출구 응답의 최대 범위, 제어 변수의 최대 크기, 포화 크기의 여러 평가 기준을 사용했다. 그러나 평가 방법은 다변수 계에서는 매우 복잡하게 된다. 제약 조건이 있는 최적 제어에서는 여러 개의 국부 최적점(local optimum)들이 존재하게 되므로 다루기가 더욱 어렵다.

이러한 단점들은 제어 목표를 성능의 강건함으로 놓고 제어기 구조에 대한 제약을 제거하면 크게 감소시킬 수 있다. H_{∞} 의 관점에서 보면 목적 함수가 scalar이지만, 이것은 모델의 부정확성, 다양한 출력 값과 조작 변수에 대한 주파수 의존(frequency-dependent) 제약 조건을 표현하도록 쉽게 나타낼 수 있다. 일반적으로 normalize한 지표로 structured singular value μ 가 사용되며, 이 값이 1보다 작은 경우는 모델의 부정확성에 의한 영향하에서 만족할 만한 성능을 나타냄을 의미한다.

Skogestad 등은 고순도의 증류탑에 대한 다양한 제어 구조를 구별하기 위한 μ 최적 제어를 사용했으며, Jacobsen 등은 단상 비동점 증류탑의 다양한 설계를 평가하기 위해서 μ 최적 PID 제어를 사용했다. 그러나 의미가 있는 강건한 제어 문제를 만드는 것과 최적 강건 제어를 결정하는 것이 간단하지는 않다. 따라서 μ 분석에서 구할 수 있는 결과와 일치하면서도 간단한 기준을 통해서 설계 대안을 선정하는 연구가 계속되고 있다. 이러한 기준에는 zero 및 시간 지연 분석, singular value, condition number, RGA(relative gain array) 등이 있다.

Morari는 제어기 설계에 관계없이 가능한 제어 성능을 제한하는 공정의 특성을 알아냈다. 이들은 시간 지연과 right-half-plane zero와 같은 non-minimum-phase behavior, actuator 한계, 모델 부정확성이다. 경우에 따라서 측정치에서의 noise가 가장 강력한 영향을 주기도 한다. Closed-loop에서 모델 오차에 대한 민감도를 나타내는 지표로서 주파수의 함수로 된 전달 행렬(transfer matrix)의 condition number가 Psarris와 Floudas에 의해서 제안되었다. 그러나 이것을 제어성 평가에 사용하기에는 몇 가지 문제가 있다. 가장 큰 문제는 condition number와 closed-loop의 안정성 및 성능에 관련된 모든 조건들이 충분 조건이기는 하지만 필요 조건은 아니라는 것이다. Condition number가 적은 공정의 closed loop performance가 모델의 오차에 민감하지 않은 경향을 보이는 것은 확실하지만, condition number가 큰 공정이라고 해서 이 공정의 성능이 나쁘다고 확신할 수는 없다.

Skogestad 등은 여러 공정 대안에 대한 상대적인 제어성을 평가하기 위해서 주파수 의존 relative gain array와 closed-loop disturbance gain (CLDG)을 혼합하여 사용하는 것을 제안했다. 이 방법은 여러 사례 연구에 적용되었다. 이 결과는 μ 최적 제어 시스템에서 얻은 closed-loop performance와 잘 일치하는 경향을 보인다. 정상 상태에서의 RGA는 Bristol에 의해

서 도입되었으며, 제어성의 지표로 산업계에서 널리 이용되고 있다. 정상 상태에서의 RGA는 다 변수 제어 시스템의 fault tolerance를 나타내지만, 제어성의 지표로는 잘못 인식될 수 있다. CLDG는 Stanley 등에 의해 정의된 relative disturbance gain에 기초하여 Hovd와 Skogestad가 도입했다. CLDG는 제어 오류와 외란의 관계에 관련이 있으며, RGA는 제어 오류와 set point 변화의 관계에 관련이 있다. 많은 경우에 주파수 의존 RGA와 CLDG의 행동을 물리적 관점에서 해석할 수 있다. 이 물리적 해석과 이론적 배경으로 인하여 RGA와 CLDG가 제어성 평가에서 매우 매력적이고 사용하기 용이한 방법으로 사용된다.

Weitz와 Lewin은 근사한 선형 동적 모델을 정상 상태 모사함으로써 제어성과 회복력을 구하였다. 권은 선형화된 공정 모델을 기반으로 condition number와 RGA를 이용한 정량적 제어성과 함께 상대 차수를 이용한 구조적 제어성을 동시에 고려하여 화학 공정의 동적 조업성 향상을 위한 절차를 제시했다. Chang은 시간 지연을 고려한 선형 동적 모델을 증류 공정에 적용하여 동적 모사를 수행하지 않고 제어성을 평가하였다.

2.3. 비선형 동적 모델에 기반한 제어성 평가

많은 경우에는 앞에서 언급한 바와 같은, 선형 모델에 기반한 제어성 평가 방법이 매우 비선형적인 시스템이나 선형 제어 시스템이 부족한 경우에도 잘 적용될 수 있다. 일반적으로 공정의 비선형성을 대부분 제거할 수 있는 간단한 static nonlinear compensator를 설계하는 것은 상당히 용이하다. 이렇게 처리한 시스템은 선형 방법으로 분석할 수 있다. 예를 들면 고순도 증류탑은 비선형적인 거동을 보인다. 그러나 relative composition deviation이나 composition의 logarithm을 제어하면, 시스템은 선형 제어 시스템으로도 적절한 성능을 보인다. 이것은 Skogestad와 Morari에 의한 고순도 증류탑에서의 LV 제어에서 알 수 있다.

드문 경우지만, 시스템이 간단한 비선형 transformation으로 쉽게 수정할 수 없는 비선형 거동을 보일 수도 있다. 예를 들어, 반응기가 변수에 대해서 매우 높은 민감도를 보이거나 약간의 온도 변화에도 매우 높은 온도로 이동할 수 있다. 이 이외에도 시스템이 다중 정상 상태, limit cycle, chaotic behavior를 보일 수도 있다. 비선형적인 특성들을 설계 단계에서 검토하기 위해서는 bifurcation analysis와 singular theory와 같은 비선형 분석 방법이 공정 설계에서 더 많이 사용되어야 한다.

Heterogeneous azeotropic distillation column이 다중 정상 상태를 보이는 것은 잘 알려져 있다. Rovaglio 등은 이러한 multiplicity와 parametric sensitivity와 관련된 제어 문제를 연구했다. Laroche 등은 이런 현상이 없다고 생각되었던 homogeneous azeotropic distillation column에서의 다중 정상 상태를 발견했다. Bifurcation diagram은 복잡한 동특성을 피하면서도 경제적이며 환경을 생각하는 측면에서 공정을 설계하도록 많이 사용되어 가고 있다. 시스템이 다중 정상 상태, limit cycle, 또는 다른 특이한 동적 거동을 보이지 않는 경우에도 외란이나 조업 변수에서의 조그만 변화에도 매우 민감할 수 있다.

비선형 시스템의 구조적 제어성(structural state controllability)은 시스템의 역변환성(invertibility)과 밀접한 관계가 있다. 일반적인 다중 입출력(MIMO) 비선형 시스템에 대한 역변환에 대한 연구는 Hirschorn에 의해서 이루어졌다. 이 연구에서는 시스템의 역변환을 구하는 알고리즘이 구성되었다. Singh은 다중 입출력 비선형 시스템의 구조적 재현에 대하여 연구하였다. Daoutidis와 Kravaris는 상대 차수(relative order)를 이용한 구조적 제어성 평가 방법을 제안했으나, 여러 공정 대안들의 우열을 판별하기에는 어려움이 많으며 체계적인 평가 절차를 제시하지 못했다. 김은 대수 미분 방정식으로 표현된 비선형 공정의 구조적 제어성을 평가하는 방법을 연구하였다.

3. 구조적 제어성

만일 공정 내에 존재하는 각각의 흐름이 전혀 연결되지 않고 각각 독립적이라면, 한 흐름에 가해진 외란은 공정의 다른 부분으로 전파되지 않아 영향을 주지 않게 되며, 이러한 공정은 제어가 가능하게 된다. 그러나, 이러한 공정은 경제적인 측면으로 볼 때 매우 불리하며 실제로는 존재하지 않는다. 특히 최근 공정 설계의 방향은 에너지의 효율적인 이용 등을 위해서 단위 공정들 간의 열병합이 많아지는 등, 복잡한 구조를 가지게 되었다. 이에 따라서 설계 초기 단계에서 직관적인 방법으로는 제어성을 평가하기가 어렵게 되었고, 설계가 끝난 후에 제어가 불가능한 공정으로 판명이 나는 경우도 있다.

이러한 복잡한 구조를 가지는 공정에서는 열병합 흐름을 포함해서 단위 공정들 간의 수많은 흐름들 사이에서 상호 연결이 일어나게 된다. 즉, 이는 공정의 일부분에서 발생한 외란이 흐름을 따라서 하류 방향으로 넓은 범위로 전파될 수 있는 경로가 매우 많이 존재하게 됨을 의미한다. 이러한 경로를 통해 전파되는 외란에 의해서 공정의 제어성이 심각한 영향을 받는 경우가 있으므로 이에 대한 주의가 필요하다. 이것은 또한 공정의 제어성을 그 공정에서 외란이 전파되어 가는 경로 또는 구조를 조사함으로써 해석이 가능함을 의미하기도 한다. 제어성의 여러 측면 중에서 공정의 구조에 따른 제어성을 구조적 제어성(structural controllability)이라고 한다. Lin 등은 구조적 제어성에 대해서 다음과 같이 정리했다.

① 외란이 공정의 다른 부분으로 전파되지 않으면 공정은 구조적으로 완전히 제어 가능하다.

② 원하지 않는 심한 외란이 전파되지 않는다면, 공정의 구조적 제어성은 좋다.

이와 같은 구조적 제어성은 다음 면에서 편리하다. 먼저 구조적 제어성의 분석에서는 정량적 제어성 분석에서 필요한 조업 조건, 공정 변수, 또는 수학적 모델이 필요하지 않다. 따라서 공정의 설계 초기 단계에서 완전한 공정의 구조나 모델을 얻기 어려울 때 유용하게 적용될 수 있다. 또한 구조적 제어성의 분석에서는 외란의 전파 경로만 대상으로 삼기 때문에 필요한 정보의 양이 작다. 즉 초기 단계에서의 제어성 분석은 최종적으로 정해진 공정의 구조가 제어 불가능하게 되는 상황을 미리 예방할 수 있으며, 여러 설계 대안 중에서 우선 순위를 미리 정할 수 있으므로 다음 설계 단계에서 고려해야 하는 설계 대안의 수를 줄일 수도 있다.

4. 결론

이러한 많은 연구에도 불구하고 화학 공정의 제어성의 평가 및 향상에 관한 연구는 미진하다. 이것은 화학 공정의 특성인 비선형성과 복잡성이 문제가 되기 때문이다. 제어성의 평가 및 향상을 가장 확실하게 수행하는 방법은 대상 공정의 동적 모사를 수행하는 것이다. 그러나 이것은 여러 조업 조건 및 변수들을 필요로 하므로, 설계 초기 단계에서 수행하기는 사실상 불가능하다. 따라서 제어성 평가 및 향상을 설계 단계에서부터 고려하기 위해서는 설계 초기 단계에서 사용할 수 있는 구조적 정보를 분석함으로써 화학 공정의 제어성을 평가하고 이를 향상시키는 절차를 개발하는 것이 필요하다.

5. 참고 문헌

김 윤식: 석사학위논문, 서울대학교, 서울, 대한민국(1997).

권 영운: 박사학위논문, 서울대학교, 서울, 대한민국(1995).

Chang T. S.: Ma. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea(1996).

Daoutidis, P. and Kumar, A.: "Structural Analysis and Output Feedback Control of Nonlinear Multivariable Processes", AICHE Journal, 40, 647(1994).

Morari, M.: "Design of Resilient Processing Plants - III. General Framework for the Assessment of Dynamic Resilience", Chem. Eng. Sci., 38, 1881(1983).