

공정시스템공학의 현황

문 일 / 이인범

연세대학교 화학공학과 / 포항공과대학교 화학공학과

1. 공정시스템공학의 정의

공학계통의 학문은 자연과학에 근거를 두고 있다. 자연과학은 크게 물리와 화학으로 대별할 수 있으며 수학은 공통 학문이라 볼 수 있다. 여기서 물리는 공학분야에서 주로 기계 및 전자공학으로 발전하여 나뉘는 학문을 구축하면서 궁극적으로 종합적인 산업시스템공학으로 확장되었다. 한편 화학은 공학분야에서 주로 화학공학으로 발전되었으며 산업 전반에 걸쳐 총체적인 공정시스템공학(Process Systems Engineering)으로 확장되었다. 이를 도표로 표시하면 그림 1과 같다.

한편 공정시스템은 그림 2와 같이 정의할 수 있다. 입력으로 부터 최종 출력을 얻기 위해 거치게 되는 적절한 과정, 즉 물리적, 화학적, 생물학적, 수학적 처리를 의미한다. 여기서 일련의 과정은 산업시스템과는 달리 화학적, 생물학적 반응 및 열과 물질전달을 수반하기 때문에 특별히 공정시스템이라고 따로 분리하고 있다.

공정시스템공학은 다루게 되는 내용에 따라 화학 및 정유 공장의 설계, 제어 및 운전을 위한 체계적이며 안전하고 효율적이며 동시에 환경문제도 해결하는 종합적인 학문으로

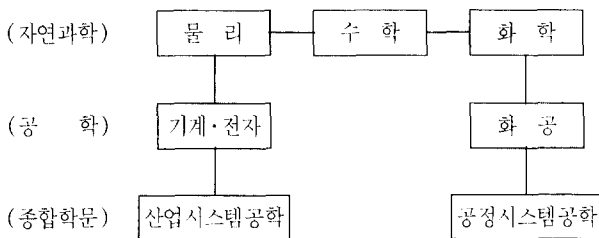


그림 1. 공정시스템 공학의 학문 분류

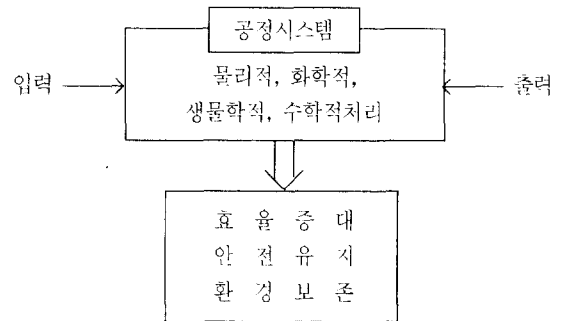


그림 2. 공정시스템의 정의

정의할 수 있다. 본 논문의 의도는 공정시스템 기술을 완벽히 총망라(review)하려는 것이 아니고 단지 공정시스템공학의 연구분야를 분류하고 각 분야의 내용과 현황을 간략히 소개하는데 있다. 비록 여러 석학들의 공통적인 의견이 포함되어 있지만 일부 내용은 필자들의 주관적인 것임을 이해하기 바라는 바이다.

2. 공정시스템공학의 분류

앞 절에서 내린 공정시스템공학의 정의를 그림 3에서와 같이 좀 더 구체적으로 분류하여 설명할 수 있다. 주요 연구 분야(major topics)로는 설계(design), 제어(control) 및 운전(operation)이 있으며 기타 응용분야로 환경, 안전 등을 포함한다. 이러한 분야에서 공통으로 부딪히는 전형적인 문제로는 공정합성(synthesis), 공정해석(analysis), 공정평가(evaluation)가 있다.[3] 또한 이러한 문제들을 풀기위한 도구로는 정량적 방법, 정성적 방법 그리고 컴퓨터를 이용하는 방법 등이 있다. 이러한 분류에 따라 분야, 분제, 도구

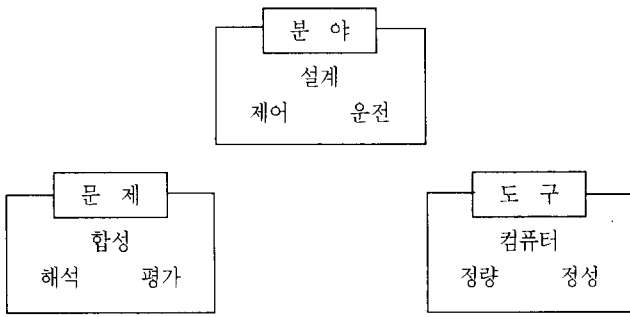


그림 3. 공정시스템공학의 분류

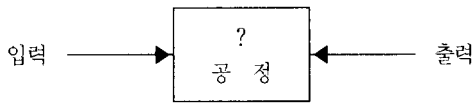


그림 4. 공정합성

를 순서대로 살펴보자.

3. 문제형태

공정시스템공학의 주요연구를 위해서 공통적으로 해결해야 할 문제의 분야는 아래와 같이 분류된다.

1.1 공정합성(Synthesis)

그림 4에서와 같이 공정의 입력과 출력을 알고 이것을 바탕으로 세부공정구조를 어떻게 구성할 것인가를 결정하는 것이 공정합성이다. 공장설계시 반응 경로의 결정, 연속식이나 회분식 공정으로의 선택 등 공정설계의 대부분 문제들이 이 범주에 속한다. 공정제어에서도 제어구조의 결정, PI, PID, IMC, DMC 등 제어알고리즘의 결정등이 공정합성에 관한 문제이다.

공정운전에서는 조업계획(planning, scheduling)문제가 이 범주에 속한다. 공정합성시 가장 큰 어려움은 결정해야 할 선택이 너무 많다는 것이다(state explosion problem). 이러한 선택들은 공정 존재 여부를 묻는 0, 1의 이산변수를 사용하여 수식화하면 결과적으로 혼합정수프로그래밍(Mixed Integer Programming)으로 표시된다. 이러한 수식표현을 컴퓨터의 도움을 받아서 해결하면 최적해를 구할 수도 있다(Optimization). 그러나 이러한 방법은 문제의 크기 즉 변수의 수가 증가하면 답을 얻기 어려운 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서 경험법칙으로 선택의 범위를 줄일 수 있다. 근래에는 인공지능 기법을 이용하여 경험법칙을 체계적으로 이용함으로써 이 분야에 많은 발전이 있으나 경험법칙 자체의 정확도 등의 문제로 이런 방법에도 한계가 있다. 최근에는 혼합정수 방법과 경험법칙 방법을 체계적으로 혼합

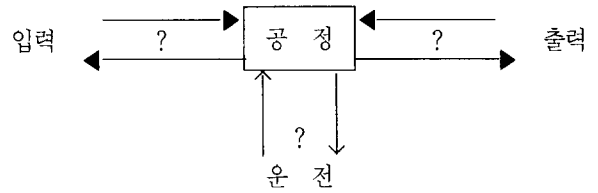


그림 5. 공정해석

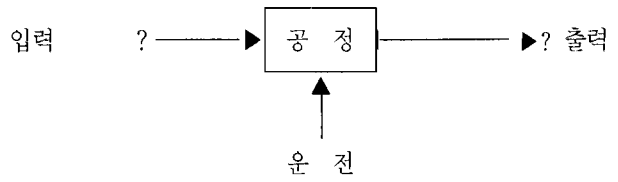


그림 6. 공정평가

하여 사용하는 방법의 연구가 활발하다.

3.2 공정해석(Analysis)

그림 5에서와 같이 공정이 정해진 상태에서 입력, 출력, 운전에 대한 정보 중 결여된사항들을 유추하는 것이 공정해석 또는 분석이다. 주요분야는 다음과 같다.

- Steady-State/Dynamic Simulation
- Data Reconciliation, Fault Diagnosis
- Distributed Parameter Models
- Sensitivity Analysis

3.3 공정평가(Evaluation)

공정, 입력상황, 운전에 대한 정보로부터 출력을 계산한다. 주로 경제(economics), 에너지 효율(energy efficiency), 운전도(flexibility, reliability, controllability)등을 평가한다.

4. 주요도구

앞 절에서 열거된 문제들을 해결하기 위해서 다음의 도구들을 주로 사용한다.

4.1 정량적 방법

- Equation Solving(Simulation)
 - algebra, ODEs, PDEs, DAEs, Boolean Logic
- Optimization
 - Linear/Nonlinear Programming, Mixed Integer Programming, Optimal Control, Stochastic Programming
- Statistics

4.2 정성적 방법

- Graph Theory
- Heuristics
- Artificial Intelligence Strategies

4.3 컴퓨터 시스템

다음과 같은 이상의 두 방법을 효율적이고 정확하게 구현하기 위해서 컴퓨터의 도움을 받을 수 있다.

- Hardware
PC/Micro/Mainframe/Super Computers, Parallel Computers, Graphics, Data Acquisition and Processing
- Software
Languages, Databases, Expert Systems, Flowsh-eeting, Equation Solving, Physical Property Prediction

5. 주요분야

공정시스템공학의 주요 연구분야는 공정설계, 공정제어, 공정운전이 있으며 공정의 효율을 높이는 것 이외에 환경 및 안전으로의 응용이 주된 분야이다.

5.1 공정설계

공정설계는 전혀 새로운 공정의 설계(grass-root design)와 기존 공정의 개선(retrofit design)으로 크게 나뉜다. 설계를 위한 주요 결정순서는 다음과 같다. ◎반응경로 결정(reaction path screening) ① 연속식 혹은 회분식 공정 결정(continuous vs. batch) ② 입출력 구조 결정(input-output structure) ③ 재순환 구조 결정(recycle structure) ④ 분리구조 결정(seperation system) ⑤ 열교환기 합성망 구축(heat-exchanger network). 각 결정단계에서 경험법칙과 수학을 기반으로하는 공정모사나 최적화 기술이 응용된다. 이러한 결정들의 결과로 다음과 같은 핵심 결과들을 얻을 수 있다. ① recipe task network ② 가장좋은 조업전략(operating strategy) ③ 각 제품 제조를 위한 장치 배치의 할당(equipment configuration assignment) ④ 장치크기. 이러한 결과들을 얻기 위하여 지금까지 축적된 경험과 이론적인 배경에 근거한 공정소프트웨어의 도움을 많이 받고 있다. 특히 컴퓨터를 이용하는 CAD(Computer Aided Design)기술의 이용추세는 점차적으로 더욱 가속화될 것으로 본다.

5.2 공정제어

공정제어 분야는 다른 분야와 유기적인 관계를 맺고 있고 공정의 자동화에 있어 특히 중요시되고 있다. 이 분야는 제

어기의 구조와 근간이 되는 이론에 따라 크게 세가지로 집약된다. 즉, 공정의 수학적 모델을 근거로 비선형공정을 선형공정으로 전환하여 공정의 비선형성을 제거함과 동시에 선형시스템에서 개발된 유익한 이론을 활용할 수 있는 geometric제어기로 Globally Linearizing Control(GLC)과 그것의 아류가 많이 개발되고 있고 실제 고분자 중합공정과 같은 많은 비선형공정에 적용하여 우수성이 확인되고 있다. 두번째로 주목받고 있는 방법은 역시 Dynamic Matrix Control(DMC)로 대변되는 예측제어를 들 수 있다. Generalized Predictive Control(GPC)과 DMC의 현장적용 사례가 급증하고 있고 나아가 공정의 비선형성이나 해당되는 공정만이 가지는 특징을 고려한 변형된 예측제어 기법의 개발에 상당한 연구가 진행중이다. 세번째로 간단하고 강건하여 가장 많이 사용되고 있는 Proportional-Integral-Derivative(PID) 제어기의 보다 쉽고 강건한 자동튜닝 방법이 80년대 초반 이후로 빠른 속도로 발전하고 있다. 90년대 이후로 자동튜닝에 있어 제어하고자 하는 공정만이 가지는 특유의 성질을 고려한 방법이 또한 많이 개발되고 있다. 조만간 자동튜닝방법과 적응제어에 있어 Self-tuning Controller간의 구분이 무의미해질 정도의 연구성과가 있을 것으로 추론된다. 이 세가지이외에도 다양한 제어방법이 소개되고 있고 제어구조의 합성에 있어서도 많은 이론적인 발전이 도모되고 있다.

5.3 공정운전

설계에 의해서 장치가 결정되고 제어 알고리즘에 의해 제어가 잘 되어도 운전방법에 따라 제품의 양이나 질이 달라질 수 있고 안전에 심각한 영향을 주기도 한다. 따라서 공정을 운전하고 유지(maintenance)하는 방법도 매우 중요하며 관련된 주요 연구로는 제조법(recipe)의 자동생성과 기존 제조법의 개선, 운전계획(planning과 scheduling), 운전의 안전점검, CIM(Computer Intergrated Manufacturing)구축 등이 있다.

특히 조업자의 실수를 감소시키기 위해서 OTS(Operator Training System)를 이용하여 효율적으로 조업자를 교육시키는 공정이 늘어가는 추세이다.

5.4 기타 응용분야

이상의 공정시스템공학의 세 가지 주요 연구분야가 고루 응용되는 최근의 주요 응용분야로 환경과 안전 그리고 회분식공정이 있다.

5.4.1 환경

환경오염 방지를 위한 공정개선 방법은 다음의 두 가지가 있다. 현재 대부분의 환경오염 방지시설은 가동하고 있는 공장에서 오염물질이 배출될 수 있는 발전소나 보일러 시설

등에 대한 오염물질 배출 패턴을 예측함으로써 오염물질이 규제치 이하로 나오도록 설계, 제어, 운전하는 방법을 사용하고 있다(end-of-pipe technology). 그러나 이러한 복잡한 방법으로는 오염물질을 줄이는데 한계가 있으므로 최근에는 공정을 초기 설계단계에서부터 공해물질을 배출하지 않는 공정을 선택하는데 좀더 적극적인 방법을 사용하는 추세이다(clean technology). 이러한 방법을 구현하기 위해서는 공정시스템 기술의 응용이 필수적이다.

5.4.2 안전

안전의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않으며, 특히 화학공정은 대단위 장치가 많고 위험한 인화물질이나 독극물을 많이 다루기 때문에 안전사고 방지를 위해 많은 노력을 기울일 필요가 있다. 안전점검을 위해 많은 법적 규제와 조직이 구성되어있으나 공장이 자동화됨에 따라 좀더 체계적인 안전점검 방법이 필요하다. 이를 위해 체크리스트, HAZOP, FTA(Fault Tree Analysis)등의 방법이 많이 사용되며 최근에는 공정소프트웨어도 점검할 수 있는 SMV(Symbolic Model Verification)방법이 개발중이다.

5.4.3 회분식 조업 최적화 기술

회분식 공정은 단일 공장에서 여러 장치를 상호 공유함으로써, 여러 종류의 제품을 생산하고 시장수요의 변화에 융통성있게 대처할 수 있는 유연성과 특수한 조업의 상황을 고려할 수 있어 정밀화학, 생화학, 식품, 제약 등의 고부가가치 제품과 다품종 소량 생산에 알맞기 때문에 근래에 들어서 선진국뿐만 아니라 개발도상국들도 선호하고 있고 많은 연구가 이루어지고 있다. 회분식 공정에 대한 최적화 기술은 공정을 이루고 있는 장치의 최적크기를 결정하는 문제, 기존공정의 개조문제, 생산시간을 최소로 하는 생산순서를 구하는 스케줄링 문제, 공정구조를 결정하는 합성문제, 장치의 노는 시간을 줄이기 위해 중간 저장탱크를 어디에 얼마만한 크기로 추가하는 문제, 회분식 반응기 제어 등의 여러 분야에서 적용되고 있다. 회분식 조업에 대한 이러한 연구들을 1960년대부터 각 분야들이 독립적으로 연구되어 왔고 90년대에 접어들어서는 이런 분야를 묶어서 연구하고 있다. MIT와 임페리얼 공대에서는 연속 공정에 적용되고 있는 ASPEN PLUS나 Speed-Up같은 통합된 소프트웨어를 회분식 조업에 대해 개발 중이다. 근래에는 자동화기술이 발전함에 따라 pipeless 공정개발에 대한 연구도 활발하다.

6. 맺음말

이상으로 공정시스템공학의 주요 연구분야를 설명의 편리를 위해서 분류하였으나 실제로 그 경계가 확실치 않는 경우도 많다. 예를 들어 설계가 끝난 후 최적 운전을 연구하다 보면 설계를 다시 수정하는 것이 좋은 경우가 생긴다. 이 때에는 설계와 운전을 동시에 고려하여야 한다. 한편 설계, 제어, 운전이 유기적으로 통합되어 종합적인 관리 시스템으로 발전하게 될 것으로 전망되며, 이러한 공정시스템공학의 핵심 기술은 환경, 에너지, 전자재료, 생물화공 등 많은 새로운 산업으로의 확대 적용도 기대되고 있다.

참고 문헌

- [1] 박선용, 문일, "조업자 교육 시스템의 특성 및 개발," 화학공업과 기술, 제12권, 6호, 1994
- [2] 이호경, 정재학, 이인범, 장근수, "Zero Wait 조업 방식에서의 다품종 생산용 회분식/반회분식 공정의 최적 설계," 화학공학, Vol.32, No.4, pp.581-586, 1994
- [3] E. N. Pistikopoulos "Process Systems Engineering," Imperial College class notes, 1993
- [4] H. Chae, Y. H. Yoon and E. S. Yoon, "Safety Analysis using an Expert System in Chemical Processes," KJChE, Vol.11, No.3, pp.153-161, 1994
- [5] I. Moon, "Modeling PLCs for Logic Verification," IEEE Control Systems, Vol.14, No.2, pp.53-59, 1994
- [6] J. H. Jung, H. K. Lee, D. R. Yang and I. B. Lee, "Completion Times and Optimal Scheduling for Serial Multiproduct Processes with Transfer and Set-up Times in Zero-Wait Policy," Comp. & Chem. Eng. Vol.18, No.6, pp.537-544, 1994
- [7] J. M. Douglas, "Conceptual Design of Chemical Processes," McGraw-Hill, p.117, 1988
- [8] S. D. Lee, J. T. Lee and S. W. Park, "Nonlinear Self-tuning Regulator for pH Systems," Automatica, Vol.30, No.10, pp.1579-1586, 1994
- [9] S. H. Jung, I. B. Lee, D. R. Yang and K. S. Chang, "Synthesis of Maximum Energy Recovery Networks in Batch Process," KJChE, Vol.11, No.3, pp.162-171, 1994



이 인 범

1973~1977 연세대학교 화학공학과 (학사)
 1977~1979 한국과학기술원 화학공학과(석사)
 1982~1987 Purdue University 화학공학과(박사)
 1979~1982 한국과학기술연구원

화공부 연구원

1987~1988 Purdue University 화학공학과 post-doc연구원
 1988~현재 포항공과대학교 화학공학과 부교수
 1994~현재 한국화학공학회 편집운영위원
 1995~현재 제어·자동화·시스템공학회 편집이사
 TEL/(0562)279-2274 FAX/(0562)279-2699
 (790-784)경북 포항시 남구 효자동 산31 포항공과대학교
 화학공학과



문 일

1983 연세대학교 화학공학과 학사
 1985 한국과학기술원 화학공학과 석사
 1992 Carnegie Mellon University 화학공학과 박사
 한국과학기술원 화공부 연구원
 Imperial College, Consultant

현재 연세대학교 화학공학과 조교수

TEL/(02)361-2761 FAX/(02)312-6401
 (120-749)서울시 서대문구 신촌동 134