

전산기를 이용한 공정 제어구조 합성에 관한 연구

노 균, 윤 인 섭
서울대학교 화학공학과

A Study on Computer-Aided Synthesis of Process Control System Structure

Kyun Lo and En Sup Yoon
Department of Chemical Engineering
Seoul National University

Abstract

The structure of chemical process has become increasingly complex, due to better management of energy and raw materials. As a consequence, the design of control systems for complete plants now constitutes the focal point of engineering interest, rather than controller designs for single processing units. Instead of traditional methods based on complex mathematical model, chemical processes are represented by structural array and cause-and-effect graph to apply non-numerical problem-solving techniques.

A systematic logical procedure to synthesize alternatives of control system structure and some heuristic rules to select a feasible solution from the vast number of alternatives that are possible are considered in this study.

1. 서 론

대부분의 제어이론은 제어변수와 조작변수, 그리고 이들의 제어구조가 결정된 상태에서 제어구조의 안정성, 제어기의 매개변수 (parameter)의 튜닝 (tuning) 등을 고려하는 것이 일반적이다. 과거의 화학공정은 공정변수간의 상호작용 (interaction)이 적게 설계되고, 공정변수 오차 허용범위가 넓었기때문에 공정을 설계하고 이 공정에 제어법칙 (control law)을 적용시키는 것이 일반적이었다.[7]

그러나, 에너지 효율을 높이고 조업의 안전성과 경제성을 향상시키기위해 공정은 점차적으로 그 구조가 복잡해지고 있다. 따라서 제어구조를 합성하는 작업이 설계자의 경험 혹은 직관에 의존하던 과거와 같은 방법으로는 어렵게되었고 좀더 체계적으로 제어구조를 설계하는 방법에 대한 관심이 집중되고 있다.

공정 제어구조 합성방법으로서, 화학공정의 동특성을 선형 또는 선형화된 상태공간모델(state space model)로 표현하고

구조적인 제어 가능성(structural controllability)을 고려하여 제어구조를 결정하는 방법이 Morari 와 Stephanopoulos [5]에 의해 비례적분제어기(proportional integral controller)에 의한 feedback 제어에 구체화되었다.

또한 Manousiouthakis 와 Arkun[4]은 상대이득행렬 (relative gain array)의 개념을 블록 단위로 확장시킨 블록 상대이득 (block relative gain)을 제안하였고 이를 바탕으로한 제어구조 합성 시스템인 RECOSS[1]등을 수치 모델을 이용한 설계 방법의 예로 들 수 있다.

본 연구에서는 기존의 수치적인 모델[8]을 바탕으로하는 제어구조 합성방법과 달리 비수치적인 모델[6]을 바탕으로한 제어구조 합성시스템인 CSSS(Control System Structure Synthesizer)를 개발하였고 CSSS 시스템으로부터 제안된 제어구조 후보를 축소시키기 위한 단위공정 모델에 대한 분석과 경험 법칙을 추가하는 작업이 진행되고 있다.

2. 본 론

(1) CSSS 시스템의 구조

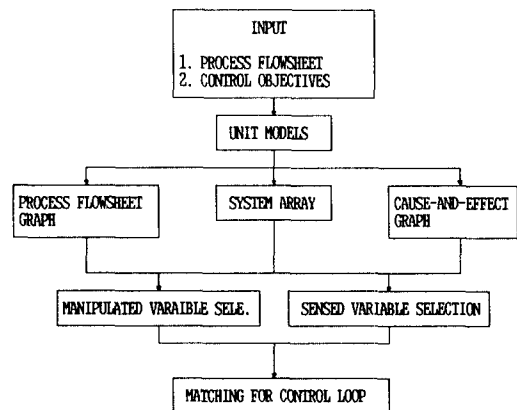


그림 1. CSSS 시스템 구성도 (System Array)

(2) 단위공정 비수치 모델

(Non-numerical Unit Process Model)

단위공정의 비수치적인 모델은 크게 두가지로 구분된다.

* 구조 행렬(Structural Array)

단위공정의 물질 수지식과 에너지 수지식에 관련된 변수의 관계를 행렬구조로 나타낸다. 각 행은 수지식을 각 열은 관련 변수를 나타낸다.

* 인과 관계 도표(Cause-and-Effect graph)

각 공정변수간의 상호작용을 노우드 (node)와 화살표로 나타낸다. 이때 화살표의 출발점은 원인을 도착점은 결과를 나타낸다.

그림 2.의 단위공정은 합류기 (mixer)를 나타낸다. 이 단위공정의 물질 수지식과 에너지 수지식은 각각 식 (1)과 식 (2)로 나타낼 수 있다.

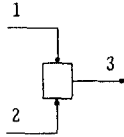


그림 2. 단위공정 (Unit Process: MIXER)

$$M3 = M1 + M2 \quad (1)$$

$$(M1 + M2)T3 = M1T1 + M2T2 \quad (2)$$

식 (1) 과 식 (2)를 그림 3.의 구조 행렬로 표현한다. 또한 공정변수간의 상호작용을 그림 4.의 인과 관계 도표로 표현한다. CSSS 시스템은 화학공정 중 8 개의 단위공정에 대한 비수치 모델 데이터 베이스가 내장되어 있다.

EQ	M1	M2	M3	T1	T2	T3
1	1	1	1	0	0	0
2	1	1	0	1	1	1

그림 3. 구조 행렬 (Structural Array)

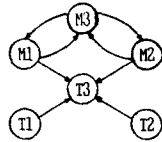


그림 4. 인과 관계 도표 (Unit Cause-and-Effect Graph)

(3) 전체 공정 모델 구성 방법

일반적으로 화학공정은 여러개의 단위공정의 조합으로 이루어진다. 비수치적인 단위공정 모델을 이용하여 전체 공정 모델을 구성하는 것은 공정의 구조를 전산기로 하여금 인식하도록 하는 위상수학(topology)적인 방법이 이용된다. 각 단위공정의 연결관계를 인식하기 위해서는 공정흐름도 (process flowsheet graph)가 이용된다. 즉, 각 stream 을 노우드 (node) 로 나타내고 단위공정을 화살표로 표시한다. 그림 5.에 나타난 공정의 공정흐름도는 그림 6.과 같이 표현된다. 공정 흐름도는 공정상의 재순환(recycle)등을 인식할 수 있는 정보를 제공한다.

전체 공정구조에 대한 입력정보를 이용하여 CSSS 시스템은 공정흐름도, 구조행렬의 집합체인 시스템행렬(System Array) 그리고 전체 공정의 인과 관계 도표를 생성시킨다.

시스템 행렬은 전체 공정을 구성하고 있는 각 단위공정의 물질 수지식과 에너지 수지식에 대한 정보 이외에도 공정 전체에 대한 물질 수지식과 에너지 수지식에 대한 정보를 자동적으로 추가시킨다. 그림 7.과 그림 8.은 각각 그림 5.의 공정에 대한 시스템행렬과 인과 관계 도표를 나타낸다.

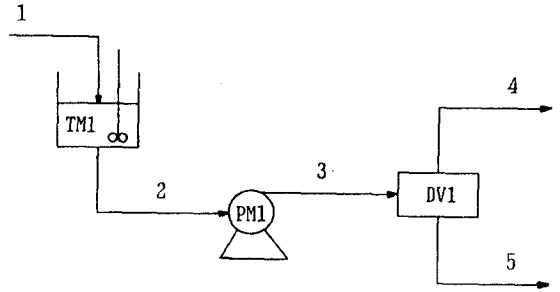


그림 5. 단위공정 조합의 예 (Sample Process)

```

----- PROCESS FLOWSHEET GRAPH -----
1 : TO M2 FROM M1
2 : TO M3 FROM M2
3 : TO M4 FROM M3
4 : TO M5 FROM M3
    
```

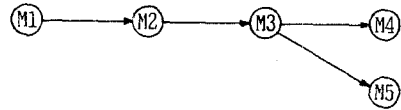


그림 6. 공정 흐름도 (Process Flowsheet Graph)

----- EQUATIONS AND VARIABLES -----

EQ.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	AND	VARIABLES
1	M1	M2									TM1H
2	T1	T2									
3	M2	M3									
4	T2	T3									
5	M3	M4			M5						
6	T3	T4									
7	T3	T5									
8	M4	M5	M1					TM1H			
9	M4	M5	M1			T4	T5	T1			

그림 7. 시스템 행렬 (System Array)

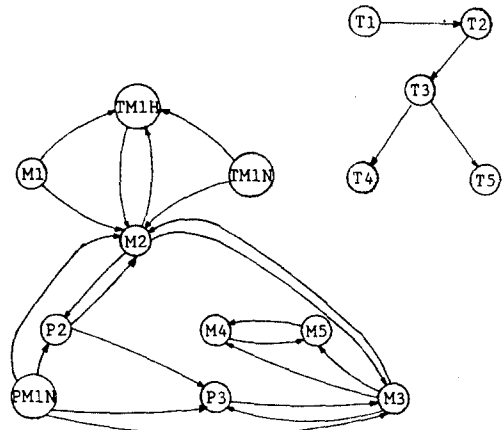


그림 8. 인과 관계 도표 (Process Cause-and-Effect Graph)

(4) 측정변수의 선택 및 분류

제어 목적 (control objective)에 따라 제어구조를 합성하고자 할때 제어변수(control variable)를 직접적으로 측정할 수 없는 경우가 있다. 이런 경우 간접적인 측정 (secondary measurement)이 가능한 변수에 대한 정보를 시스템행렬로부터 얻을 수 있다. 이를 측정변수 수형도 (Sensed Variable Tree)로 그림 9.와 같이 나타낼 수 있다. 측정변수 수형도는 변수 측정에 있어서 AND/OR 관계를 나타낸다. 즉, AND 관계에 있는 변수들은 동시에 측정해야만 제어변수의 값을 알 수 있고, OR 관계에 있는 변수는 단독으로 제어변수 값을 알 수 있게 해준다. 측정변수 수형도가 완성되면 그 구조를 논리법칙에 따라 추론하여 가능한 측정변수 집합을 제안한다.

(1 . 1)

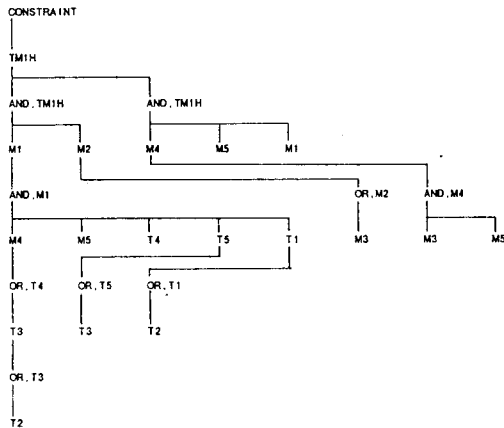


그림 9. 측정변수 수형도 (Sensed Variable Tree)

제안된 측정변수 집합의 분류는 인과 관계 도표의 정보를 이용하여 이루어진다. Govind 와 Powers[2,3]의 알고리즘에 따라 세계의 소집합 (subset)으로 분류할 수 있는데 각각의 분류 기준과 적용은 다음과 같다.

- 소집합 1. 제어변수의 영향을 받는 변수 집합.
피이드백(feedback) 제어구조.
- 소집합 2. 제어변수에 영향을 주는 변수 집합.
피이드 포워드(feedforward) 제어구조.
- 소집합 3. 소집합 1. 과 소집합 2.에 포함되지 않은 변수 집합과 소집합 1. 과 소집합 2.의 조합으로 이루어진 변수 집합.
캐스케이드(cascade) 제어구조.

그림 10.은 측정 가능한 변수 집합과 그 분류에 대한 출력 결과이다.

----- SENSED VARIABLE POSSIBILITIES -----

[1]	SET. 1	:	TM1H						
[2]	SET. 2	:	M1	M2					
[3]	SET. 3	:	M4	M5	M1				
[3]	SET. 4	:	M2	M4	M5	T1	T4	T5	
[2]	SET. 5	:	M1	M3					
[3]	SET. 6	:	M1	M3	M5				
[3]	SET. 7	:	M1	M5	T1	T4	T5		
[3]	SET. 8	:	M1	M3	M4				
[3]	SET. 9	:	M1	M4	T1	T4	T5		
[3]	SET. 10	:	M4	M5	T1	T4	T5		

그림 10. 측정 가능한 변수 집합 (Sensed Variable Possibilities)

----- MANIPULATED VARIABLE POSSIBILITIES -----

LEVEL 1	:	M1	M2	TM1H
LEVEL 2	:	M3	PM1N	
LEVEL 3	:	NO CANDIDATE VARIABLE !		

그림 11. 조작 가능한 변수 집합 (Manipulated Variable Possibilities)

(5) 조작변수의 선택

인과 관계 도표의 정보를 이용하여 조작변수를 제안한다. 이때 각 노드간의 거리의 비율을 각 공정변수간의 상호작용에 나타나는 시간지연(time delay)의 상대적인 비율로 가정하여 제어변수에 가장 신속한 영향을 미칠 수 있는 변수들의 집합을 추론해 낸다. 조작변수 선택을 위한 인과 관계 도표의 탐색에 있어서 탐색 깊이 한계(depth bound)는 입력과정에서 임의로 설정할 수 있다. 또한 조작 가능한 변수 집합의 크기를 축소시키기 위해서 다음과 같은 경험법칙(heuristic law)이 적용된다.

- 경험법칙 1. 화학공정에서는 온도와 압력은 직접적인 방법으로 조작할 수 없다.
- 경험법칙 2. 다른 공정변수들과 상호작용이 심한 변수는 일반적으로 조작변수에서 제외된다.

그림 11.은 조작 가능한 변수 집합의 출력 결과이다.

(6) 제어구조 합성

CSSS 시스템으로 부터 제안된 측정변수와 조작변수 집합을 이용하여 제어구조 후보를 제안하기 위해서 제안된 집합의 원소들을 순차적으로 뺏어준다. 그림 5.의 공정에 대하여 단위공정 TM1의 액위를 일정하게 유지하고자 할때 가능한 제어구조는 액위를 측정하여 stream 1의 유량을 조작하는 피이드백 제어구조와 stream 1 과 stream 2의 유량을 측정하여 stream 2의 유량을 조작하는 피이드 포워드 제어구조등을 예로 들 수 있다.

(7) 제어구조 선별

제안된 제어구조에 대한 선별작업은 각 공정변수간의 상호 작용 분석(interaction analysis)과 경제성 분석등을 통해 이루어질 수 있다. 또한 각 구조에 대한 동특성모사(dynamic simulation) 작업이 수행된다면 제안된 제어 구조에 대한 신뢰도는 증가될 수 있다.

3. 결 론

CSSS 시스템은 비수치적인 모델을 바탕으로 하고 있기 때문에 공정구조 설계와 제어구조 설계를 동시에 수행할 수 있다는 장점을 가지고 있을뿐만 아니라 기존 공정에 대한 적용 결과를 토대로 제어구조의 개선을 도모할 수 있다. 또한 수행도와 인과 관계 도표에 대한 추론 기구(inference engine)는 FTA(Fault Tree Analysis)와 인과 관계 도표를 이용한 공정 안전도 분석의 도구로 이용될 수 있다.

그러나, 각 단위공정 모델의 정확도가 향상되어야 하고 각 단계에서 좀더 많은 경험법칙이 추가되어야 한다. 또한 제어 목적간의 상호작용이 발생될 수 있는 공정과 다변수 제어의 문제 그리고 구조적인 제어 불가능성(structural uncontrollability)을 인식하는 문제에 대한 분석 능력이 보장되어야 한다.

4. 참 고 문 헌

- [1] 심 문 호, "화학 공정의 Regulatory 제어 구조 합성에 관한 연구", 석사학위 논문, 서울대학교 화학공학과(1987)
- [2] Govind, R., and G.J.Powers, "Synthesis of Process Control Systems", IEEE Trans., SMC-8, 792(1978)
- [3] Govind, R., and G.J.Powers, "Control System Synthesis Strategies", AIChE J., 28, 60(1982)
- [4] Manousiouthakis, V., V.R.Savage, and Y. Arkun, "Synthesis of Decentralized Process Control Structures Using the Concept of Block Relative Gain", AIChE J., 32, 991(1986)
- [5] Morari, M., Y. Arkun, and G. Stephanopoulos, "Studies in the Synthesis of Control Structures for Chemical Processes", Part 1,2, AIChE J., 26, 220(1980)
- [6] Nilsson, N.J., Problem Solving Methods in Artificial Intelligence, McGraw Hill, New York(1971)
- [7] Nishida, N., G. Stephanopoulos, and A.W. Westerberg, "A Review of Process Synthesis", AIChE J., 27, 321(1981)
- [8] Shinsky, F.G., Process Control Systems, McGraw Hill, New York(1967)