

## 화학공정의 제어구조 합성에 관한 연구

심 문 호 ,      윤 인 섭 ,      송 형 근\*  
 서울대학교      화학공학과,      한국과학기술원\*

A Study on the Regulatory Control Structure Synthesis  
 in Chemical Processes

Mun Ho Shim, En Sup Yoon, Hyung Kun Song  
 Dept. of Chemical Engineering, S.N.U., KAIST

## Abstract

The Synthesis of control structure involves the selection of controlled variable (or measured variable), and the structure interconnecting measured and manipulated variables (control loops). This paper deals with the synthesis job by using the structural analysis and block relative gain. This synthesis tool is very useful because they require minimal information, and the results show that this is a systematic and efficient methodology.

## 1. 서      론

공정의 경제성이 중요한 문제로 등장하게 됨에 따라 원료와 에너지의 절감 그리고 고정자본을 감소시키려는 노력이 꾸준히 있어왔다. 이에 따라 공정은 점점 복잡해지고 공정의 안전율은 작아지게 되어 공정의 제어구조를 설계하는 것이 과거와 같이 경험이나 직관에 의해서 어렵게 되었다. 또한 공정이 단위공정들끼리 서로 연결되고 원료 및 에너지의 재순환이 많아짐에 따라 각 단위공정들간의 간섭(interaction)이 중요한 문제가 되었다.

대부분의 제어이론은 측정변수와 조작변수가 미리 정해진 상태에서, 즉 제어구조가 정해진 상태에서, 각 제어이론(control law)을 적용시켜 최적의 제어 매개변수의 값을 튜닝하는 것이다. 그러나 전체공정중에서 어떤

측정변수와 어떤 제어변수를 연결시켜야 하는 문제는 많이 연구되지 않았었다.

공정의 제어구조를 조직적으로 설계하기 위한 방법으로 1976년 Govind 와 Powers 는 원인-결과도표(cause-effect diagram)을 이용한 제어구조 합성방법을 제안했다. 이 방법은 공정변수들간의 관계를 '원인'과 '결과'로 나타내어 제어변수에 영향을 미치는 조작변수를 선택하게 된다. 1980년 Morari 와 Stephanopoulos 는 Structural Controllability와 Observability를 이용한 구조해석(structural analysis) 방법을 제안했는데 이는 원인 결과 도표의 Accessibility 외에 Controllability와 Observability 를 이용하므로 좀더 합리적인 방법이라 평가된다.

그러나 위의 방법들은 가능한 제어구조를 발견할 수는 있어도 최적의 제어구조는 발견할 수 없다. 최적의 제어구조는 하나의 제어루프가 다른 제어루프와 거의 간섭이 없어야 하며 또한 이득(Gain)이 1에 가까워야 한다.

1986년 Manousiouthakis 와 Arkun은 Block Relative Gain을 발표했는데 이는 제어구조의 간섭을 효과적으로 측정할 수 있으며, SISO 시스템에만 적용될 수 있었던 Relative Gain Array를 MIMO 시스템으로 확장시킬 수 있으므로 많은 가능한 제어구조 중에서 최적의 제어구조를 발견하는데 유용한 수단이 된다.

본 연구에서는 공정의 최적의 제어구조를 설계하기 위하여 구조해석과 Block Relative Gain 을 도입한다. 이와 함께 경험법칙이 사용되며, 이들은 complex column을 비롯한 몇가지 공정에 적용시켜 그 유용성을 조사한다.

## 2. 이 론

### (1) 구조해석

다음과 같은 선형계에 대하여

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

$$(x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, y \in \mathbb{R}^r)$$

구조행렬  $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 이 Structural Controllable이기 위한 필요충분조건은

1)  $(A \ B)$ 이 structural controllable

2)  $\text{rank} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = n+r$

이다.

구조행렬 (structural Matrix)은 공정의 동적상태관계식 (Dynamic Equation Relationship)에서 얻게되며, 이는 한 변수가 다른 변수에 영향을 미치게 되는가 미치지 않은가를 표시한 행렬이다. (영향을 미치면 '1'로 표시하고, 그렇지 않으면 '0'으로 표시한다.)

공정의 제어구조는 그 공정의 자유도에 의해 결정되며 이 자유도를 위반했을 때는 rank 는  $n+r$ 과 같지 않게 된다. 위와같이 rank 결핍이 생기게 되는 것은 공정의 제어변수보다 조작변수가 적거나 또는 많은 경우이다.

대부분의 공정은 주어진 제어목적에 해당하는 제어변수 (또는 측정변수) 보다는 조작가능한 변수가 훨씬 많으므로 이들 중에서 적절한 조작변수를 선택해야한다. 본 연구에서는 이러한 선택을 항상 구조행렬의 rank 를 만족시키며 수행하기 때문에 공정의 자유도는 항상 만족된다.

조작변수의 선택은 다음과 같은 순서로 행해질 수 있다.

첫째, 주어진 구조행렬의 '1'로 표시된 원소를 행렬의 좌하변으로 재정리 시킨다. 둘째, 재정리된 구조행렬의 rank 를 결정하여 자유도를 위반하는지, 안하는지를 조사한다. 셋째, 적절한 조작변수를 선택한다. Fig.1에 조작변수를 선택하는 흐름도(Flow Chart)를 나타내었다.

Fig.1의 유희도에서 결정된  $\alpha$  값은 최대한 제거시킬수 있는 조작변수의 수를 나타내며, 이로부터 적절한 조작변수를 선택할 수 있다. 이와함께 경험법칙이 사용되며 다음과 같은 경험법칙이 있다.

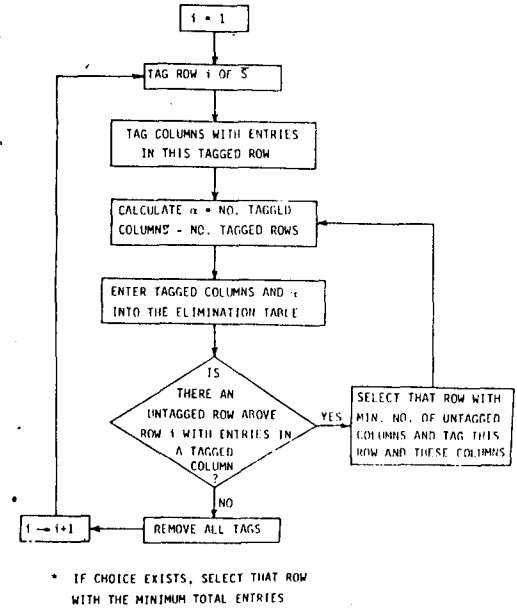


Fig.1. Selection of manipulation variables while maintaining full generic rank

1) 유체의 흐름(Flows)은 다음과 같은 경우 조작변수로 사용하지 말라.

- 그 양이 매우 클때
- 매우 높은 온도일 때
- 슬러지일때
- 부식성 유체일때

2) 압력은 다음과 같은 경우 조작변수로 사용하지 말라.

- 유체가 휘발성이 강할때
- 유체가 2상 혼합물일때
- 고체가 존재할때

3) 많은 변수의 변화를 일으키는 압력이나 유체의 흐름은 조작변수로 사용하지 말라.

또한 이외에 어떤 공정에 한정된 경험법칙이 사용될 수 있다.

일반적으로 구조해석과 경험법칙이 사용되면 가능한 제어구조가 여러개 생기게 되며, 최적의 제어구조는 공정의 정보를 더 많이 알아야 선택될 수 있다.

(2) Block Relative Gain(BRG)

Fig.2.와 같이 제어기 K와 필터 F를 가진 feed-back제어가 있고, n x n 전달함수는 다음과 같이 부분화 되어 있다.

$$G = \begin{matrix} \begin{matrix} \leftarrow m \rightarrow & \leftarrow n-m \rightarrow \\ \begin{matrix} m \\ n-m \end{matrix} \downarrow \end{matrix} \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \text{with} \quad \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{matrix} \begin{matrix} \leftarrow m \rightarrow & \leftarrow n-m \rightarrow \\ \begin{matrix} m \\ n-m \end{matrix} \downarrow \end{matrix} \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{matrix} \begin{matrix} \leftarrow m \rightarrow & \leftarrow n-m \rightarrow \\ \begin{matrix} m \\ n-m \end{matrix} \downarrow \end{matrix} \begin{bmatrix} F_1 & 0 \\ 0 & F_2 \end{bmatrix}$$

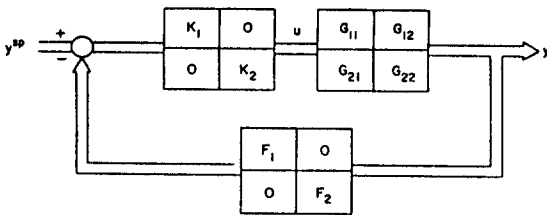


Fig.2. Decentralized feedback system

이때 BRG는 다음과 같이 정의되며, 그 성질은

$$BRG_t = \left[ \frac{\partial y_1}{\partial u_1} \Big|_{\substack{u_2=0 \\ F_2=0}} \right] \cdot \left[ \frac{\partial y_1}{\partial u_1} \Big|_{\substack{y_2=0 \\ F_2=0}} \right]^{-1} - G_{11} \cdot [G^{-1}]_{11}$$

$$BRG_r = \left[ \frac{\partial y_1}{\partial u_1} \Big|_{\substack{y_2=0 \\ F_2=0}} \right]^{-1} \cdot \left[ \frac{\partial y_1}{\partial u_1} \Big|_{\substack{u_2=0 \\ F_2=0}} \right] - [G^{-1}]_{11} \cdot G_{11}$$

Relative Gain Array(RGA)와 유사하다. 즉 부분화된 Block의  $BRG_1 = I$  (identity matrix)이면 그 block은 다른 block과 간섭이 없고 다른 block의 존재여부에 상관없이 하나의 제어부품을 구성할 수 있다. 물론 실제로는 어느정도의 간섭이 존재하므로  $BRG_1$  이 단위행렬이 될 수는 없고 그 정도여부는 사용자의 경험에 의존한다.

BRG와 RGA는 다음과 같은 관계를 가지고 있으며

$$(BRG)_t(i,i) = \sum_{j=1}^m RGA(i,j)$$

$$(BRG)_r(i,i) = \sum_{j=1}^m RGA(j,i)$$

따라서, RGA로 부터 BRG 을 얻을 수 있다.

BRG을 사용하여 최적의 제어구조를 합성하는 방법은 다음과 같다.

1) 1 x 1 block부분화를 구한다. 이것은 전체공정을 SISO 시스템으로 제어구조를 설계하는 것으로 전통적인 Bristol의 RGA와 같다.

2) 1 x 1 block 부분화에서 제어구조가 설계되지 않은 부분은 2 x 2 block 부분화를 구한다. BRG와 RGA와의 관계에 의해 이것은 두 행벡터의 합으로 구해진다.

3) 1 x 1, 2 x 2 block으로 제어구조가 설계되지 않은 부분은 더 높은 차원의 block 부분화를 구한다.

공정의 구조해석과 BRG에 의해서 가능한 최적제어구조가 하나 또는 몇가지 남게된다. 몇가지 가능한 제어구조는 경험법칙에 의하거나, 동특성모사에 의해 최적의 제어구조를 설계할 수 있으며, 그 전과정을 Fig.3.에 나타내었다.

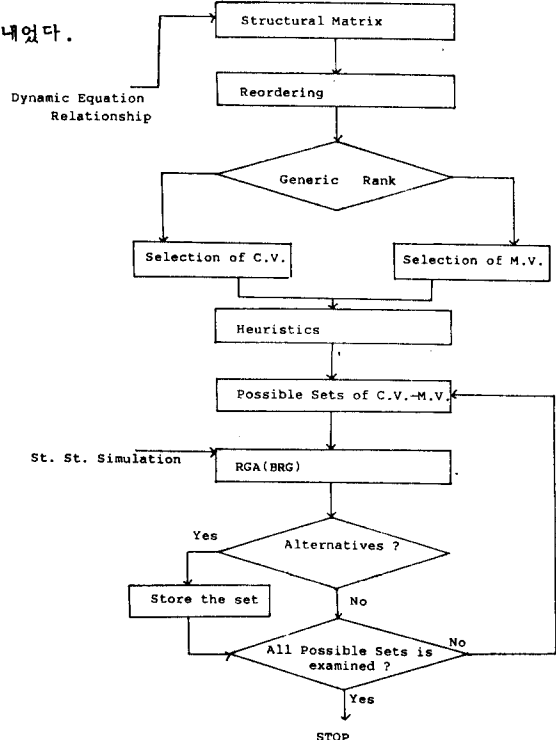


Fig.3. Control Structure Synthesis-Algorithm

### 3. 적용 및 검토

본 연구에서는 주어진 구조행렬에 대하여 구조 해석과 경험법칙을 수행하고 BRG를 이용하여 최적의 제어구조를 합성하는 Software시스템을 개발하였다.

공정의 최적제어구조는 일반적으로 많은 가능한 구조 중에서 선택되어야 하므로 그 적용방법과 정보의 획득이 간단하고 빨라야 한다. 본 시스템은 수치정보가 필요없는 구조해석을 통하여 비합리적인 구조는 제거시키고, 또한 정상상태모사에서 최소한의 정보로 최적에 가까운 제어 구조를 합성하므로 매우 유용하다고 사료된다.

본 System을 이용하여 간단한 단위공정과 Complex Column을 비롯한 복잡한 공정의 제어구조를 효과적으로 설계할 수 있음을 확인했다.

본 연구에서는 feedback과 regulation제어만을 고려했는데 이것은 앞으로 feedforward, cascade 제어 그리고 Optimizing 제어구조로 확장되리라 생각한다.

### 4. 참고 문헌

1. N. Nishida et al., "A Review of process Synthesis", AIChE J. 27, 321(1981)
2. M. Morari, G. Stephanopoulos, "Studies in the Synthesis of Control Structures for Chemical Processes", AIChE J. 26, 220(1980)
3. R. Govind, G. J. Powers, "Synthesis of Process Control Systems", IEEE Trans.sys.man cyb., FMC-8, 792 (1978)
4. G. Stephanopoulos, "Synthesis of Control Systems for Chemical Plants", Computers & Chem. Eng. 7, 331(1983)
5. V. Manousiouthakis, Y. Arkun, "Synthesis of Decentralized Process Control Structures using the Concept of Block Relative Gain", AIChE J. 32, 991(1986)
6. R. D. Johnston, G. W. Barton, M. L. Brisk, "Single-input-single-output Control System Synthesis", Computers & Chem. Eng. 9, 547(1985)