

부하 영향 및 연계가 제거된 증류탑 제어구조

이태철(학), 양대륙(정)
고려대학교 공과대학 화학공학과

Disturbance Rejected and Decoupled (DRD) Control Structure of Distillation Columns

Tae Chul Lee and Dae Ryook Yang
Department of Chemical Engineering, Korea University

서론

증류탑의 제어는 공정산업에서 그 비중이 높아 지속적인 연구가 진행되어 왔다. 그 중 제어를 위한 변수들을 어떻게 선정하는가에 관한 제어구조 연구도 활발히 진행되고 있다. 증류탑 제어는 5개의 제어 변수와 5개의 조작 변수로 나누어진다. 피제어변수는 탑상과 탑저의 액위, 탑의 압력, 탑상과 탑저 생성물의 조성이고 조작변수는 생성물의 유량, 환류량과 리보일러에 가해지는 열량, 응축기에서 제거되는 열량 등이다. 일반적으로 압력은 응축기에서 제거되는 열량이나 환류의 온도를 이용하여 제어하거나 피제어변수로 간주하지 않게 되면, 증류탑제어는 4×4 제어 시스템이라 할 수 있다. 이를 전통적인 제어방식에 의하면 에너지 수지를 제어하는 구조(LV)와, 물질수지를 제어하는 구조(DV, LB, DB)를 비롯하여 비제어 등 여러 가지가 있다.

최근의 연구에 의하면 하나의 제어구조를 알면 다른 제어구조를 구할 수 있는 구조 변환(Structural Transformation)이 개발되었다[1-5]. 즉, 다른 형태의 조작변수를 사용하는 경우 생산물 조성의 동특성을 구조 변환을 통하여 새로 모델을 구하거나 실험을 거치지 않고 예측하는 것이 가능해 졌다. 다른 측면으로 바람직한 조성의 동특성을 안다면 어떤 형태의 조작변수가 사용되어야 하는지도 알 수 있다는 것이다. 다변수 입출력 공정의 문제점 가운데 하나는 제어루프간 상호작용에 의한 연계이므로 이를 없애주고, 외란이 들어왔을 때 그 영향이 최소화될 수 있다면 바람직한 공정의 특성이 갖추어진 것으로 생각할 수 있다. 따라서 사용자가 원하는 부하 영향 및 연계가 제거된 구조(DRD Structure)가 만들어질 수 있고 정상상태의 특성만을 고려한 DRD 구조가 이미 발표된바 있다[2].

본 연구에서는 이러한 DRD 구조를 동특성을 고려한 Dynamic DRD로 확장하는 것에 대하여 논의를 할 것이다.

본론

1. 구조 변환(Structural Transformation)

증류탑 제어구조의 구조변환은 정상상태의 관계만을 고려한 경우 Häggblom과 Waller에 의해 논의되었다[1]. 이 방법은 완벽한 inventory 제어를 가정하거나 구조변환에서 inventory 제어의 조작변수가 변하지 않는 경우에는 동특성이 구해지도록 확장할 수 있다. 그러나 일반적인 제

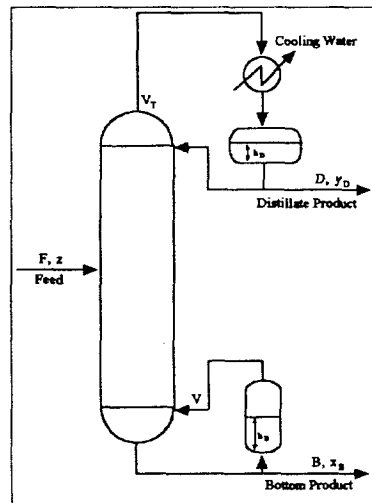


그림 1. 증류탑의 구성과 주요변수들.

어구조의 동적인 변환이 되지못하므로, Yang 등과 Lee와 Park에 의해 일반적인 동적 구조변환이 논의되었다[3, 5].

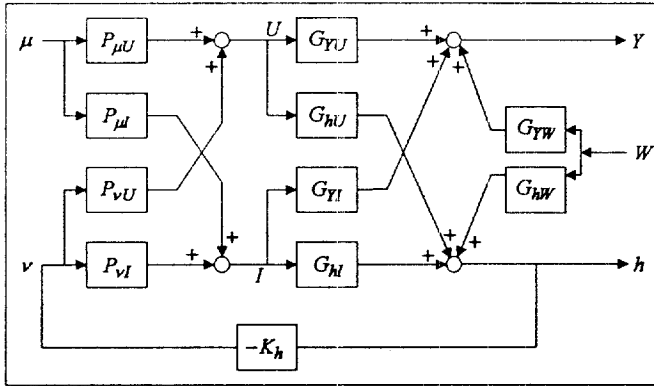


그림 2. 일반적 증류탑 제어구조의 블록선도

증류탑의 주요변수들과 구성은 그림 1에 나타나 있고 각 요소들에 대한 블록선도는 그림 2에 제시되었다. 이 그림에서 inventory 액위(h)의 동특성을 나타내는 G_{hU} , G_{hI} 와 G_{hW} 는 적분공정으로서 전달함수가 $1/s$ 를 포함하고 있다. 이 때 표현의 편리를 위하여 $1/s$ 를 제외한 나머지를 각각 K_{hU} , K_{hI} 와 K_{hW} 로서 표현하기로 한다.

가장 단순한 제어구조인 LV 구조를 기본으로 구조변환을 살펴보자. LV 구조의 모델은 다음과 같은 전달함수 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta Y \\ \Delta I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{YU} \\ G_{IU} \end{bmatrix} \Delta U + \begin{bmatrix} G_{YW} \\ G_{IW} \end{bmatrix} \Delta W \quad (1)$$

여기서, $\Delta Y = [\Delta y \ \Delta x]^T$ 는 피제어변수의 벡터; $\Delta I = [\Delta D \ \Delta B]^T$ 는 inventory 제어를 위한 조작변수의 벡터; $\Delta U = [\Delta L \ \Delta V]^T$ 는 조성제어를 위한 조작변수의 벡터; $\Delta W = [\Delta F \ \Delta z]^T$ 는 외란변수의 벡터를 나타낸다. 이에 대해 다른 구조의 새로운 변수와 LV구조의 변수는 다음과 같은 관계를 가진다고 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta \mu \\ \Delta \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{vI} & H_{vU} & H_{vW} \\ H_{\mu I} & H_{\mu U} & H_{\mu W} \\ 0 & 0 & H_{\omega W} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I \\ \Delta U \\ \Delta W \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, H 는 새로운 변수와 원래의 변수 사이의 대수적 관계를 나타내는 행렬이고, $\Delta v = [\Delta v_1 \ \Delta v_2]^T$ 는 다른 구조에서 inventory 제어를 위해 사용되는 조작변수의 벡터, $\Delta \mu = [\Delta \mu_1 \ \Delta \mu_2]^T$ 는 다른 구조에서 조성제어를 위한 조작변수 벡터, $\Delta \omega = [\Delta \omega_1 \ \Delta \omega_2]^T$ 는 다른 구조에서 외란변수 벡터를 나타낸다. 또한 G_{IU} 와 G_{IW} 은 inventory 제어방식에 따라 변화하는 전달함수로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_{IU} &= [s(P_{vI}K_{hI}K_h)^{-1} + I]^{-1}K_{hU} \\ G_{IW} &= [s(P_{vI}K_{hI}K_h)^{-1} + I]^{-1}K_{hW} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2)의 관계에 의해 식 (1)은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} \Delta Y \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{Y\mu} \\ G_{v\mu} \end{bmatrix} \Delta \mu + \begin{bmatrix} G_{Y\omega} \\ G_{v\omega} \end{bmatrix} \Delta \omega \quad (4)$$

식 (4)에서 전달함수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} G_{Y\mu} \\ G_{v\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{YU} \\ H_{vU} + H_{vI}G_{IU} \end{bmatrix} (H_{\mu U} + H_{\mu I}G_{IU})^{-1} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} G_{Y\omega} \\ G_{v\omega} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} G_{YW} \\ H_{vW} + H_{vI}G_{IW} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_{Y\mu} \\ G_{v\mu} \end{bmatrix} (H_{\mu W} + H_{\mu I}G_{IW}) \right\} H_{\omega W}^{-1} \quad (6)$$

이 표현은 Yang등에 의해 구해진 것과 동일하다[4]. 그러나 위의 표현은 식 (3)을 이용하여 G_{IU}^* 와 G_{IW}^* 를 명백하게 유도하였으므로, 새로운 구조를 G_{IU}^* 와 G_{IW}^* 를 사용하지 않고 구하였다는 것이 다르다.

2. 부하 영향 및 연계가 제거된 구조(DRD Structure)

Hägglblom과 Waller는 정상상태의 관계를 이용하여 부하 영향 및 연계가 제거된 구조를 제시하였다[2]. 이를 동특성을 고려한 동적 구조변환 방법을 이용한다면 즉, 다음의 조건 $G_{YU} = I, G_{YU} = 0$ 을 만족하면 부하 영향 및 연계가 제거된 구조를 구성할 수 있다[4]. 여기서 $G_{YU} = I$ 는 완전한 연계제거(decoupling)를 의미하고 $G_{YU} = 0$ 은 외란의 영향이 없음(no disturbance propagation)을 의미한다. G_{YU} 로서 I 대신 바람직한 전달함수 G_d 를 사용하여 H_{μ} 와 $H_{\mu U}$ 를 구해보면 다음과 같다.

$$H_{\mu I} = G_d^{-1} G_{YU} G_{IW}^{-1} \tag{7}$$

$$H_{\mu U} = G_d^{-1} (G_{YU} - G_{YU} G_{IW}^{-1} G_{IU})$$

그러므로 새로운 조성에 대한 조작변수는 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta\mu = H_{\mu U} \Delta U + H_{\mu I} \Delta I \tag{8}$$

식 (8)을 조성제어 변수에 대한 식으로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta U &= H_{\mu U}^{-1} (\Delta\mu - H_{\mu I} \Delta I) \\ &= H_{\mu U}^{-1} \Delta\mu - H_{\mu U}^{-1} H_{\mu I} \Delta I \end{aligned} \tag{9}$$

식 (8)의 $H_{\mu U}^{-1}$ 과 $-H_{\mu U}^{-1} H_{\mu I}$ 는 각각 블록선도에서는 $P_{\mu U}$ 와 $P_{\mu I}$ 이다. $P_{\mu U}$ 와 $P_{\mu I}$ 를 전달함수들로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{\mu U} &= (G_{YU} - G_{YU} K_{hW}^{-1} K_{hU})^{-1} G_d \\ P_{\mu I} &= (K_{hW} G_{YU}^{-1} G_{YU} - K_{hU})^{-1} [(P_{\nu I} G_{hI} K_h)^{-1} + I] \end{aligned} \tag{10}$$

결과 및 토의

표 1에 주어진 LV구조 전달함수를 이용하여 정상 상태에서의 부하 영향 및 연계가 제거된 구조(SDRD)와, 동특성을 고려한 부하 영향 및 연계가 제거된 구조(DDR)를 구하였다. 이러한 구조에서 탑상생성물의 농도에 대한 조작변수와 원료 유입량에 0.01크기의 계단 함수를 입력했을 때의 응답을 각각 그림 3-6에 나타내었다. 그림 3의 경우를 제외한 대부분의 경우에서 부하 영향 및 연계를 제거한 SDRD구조나 DDRD구조가 LV구조에 비해 훨씬 향상된 열린 루프 응답을 얻을 수 있었다.

표 1. UCBS 모사 모델에 대한 LV구조 전달함수

$Y = \begin{bmatrix} \Delta y \\ \Delta x \end{bmatrix}, h = \begin{bmatrix} \Delta h_D \\ \Delta h_B \end{bmatrix}, \mu = \begin{bmatrix} \Delta \mu_1 \\ \Delta \mu_2 \end{bmatrix}, \nu = \begin{bmatrix} \Delta \nu_1 \\ \Delta \nu_2 \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} \Delta L \\ \Delta V \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} \Delta D \\ \Delta B \end{bmatrix}, W = \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta z \end{bmatrix}$			
$G_{YU} = \begin{bmatrix} -3.58e^{-2.1s} & 3.38e^{-2.2s} \\ 19.2s+1 & 19.8s+1 \\ 13.9e^{-1.2s} & -18.9e^{-0.6s} \\ 13.2s+1 & 12.6s+1 \end{bmatrix}$		$G_{YU} = \begin{bmatrix} -0.515e^{-3.7s} & 23.1e^{-4.9s} \\ 27.6s+1 & 22.8s+1 \\ 19.97e^{-0.4s} & -213e^{-1.5s} \\ 10.8s+1 & 14.5s+1 \end{bmatrix}$	
$G_{hU} = \begin{bmatrix} -0.775 & 0.818 \\ s & s \\ 0.775 & -0.818 \\ s & s \end{bmatrix}$	$G_{hI} = \begin{bmatrix} -1.0 & 0 \\ s & s \\ 0 & -1.0 \\ s & s \end{bmatrix}$	$G_{hW} = \begin{bmatrix} 0.038 & -1.2 \\ s & s \\ 0.962 & 1.2 \\ s & s \end{bmatrix}$	$K_h = \begin{bmatrix} -1.0 & 0 \\ 1.14 & 1.14 \\ 0 & -1.0 \\ 1.75 & 1.75 \end{bmatrix}$

탑상생성물의 농도에 대한 조작변수에 계단 입력을 가했을 경우 DRD구조는 LV구조와 달리 조성의 응답에 연계가 제거된 형태가 얻어졌고 외란의 영향도 정상상태 이득이나 과도적 응답에서 매우 향상된 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 DRD 구조의 목적이므로 예견된 것이라 할 수 있다.

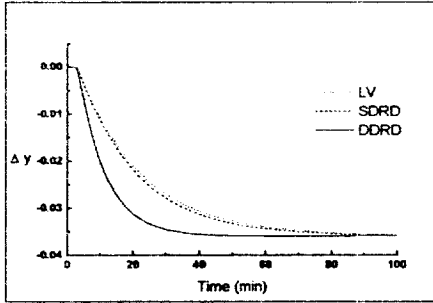


그림 3. 탑상 생성물 조성 조작변수에 대한 탑상 농도 계단 변화 응답.

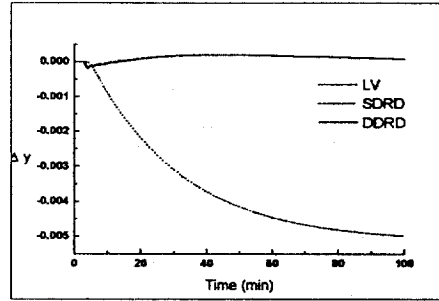


그림 5. 원료 유량 변화에 대한 탑상 농도 계단 변화 응답.

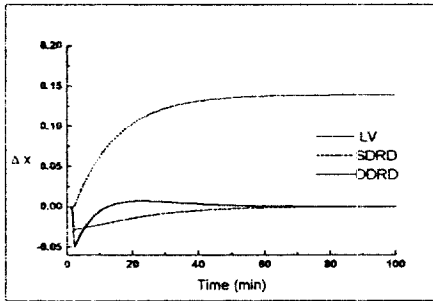


그림 4. 탑상 생성물 조성 조작변수에 대한 탑저 농도 계단 변화 응답.

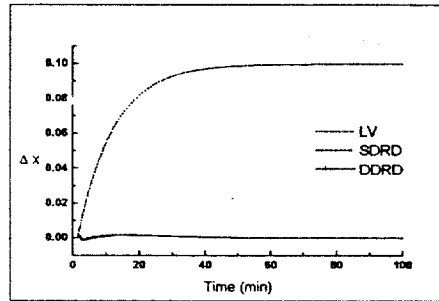


그림 6. 원료 유량 변화에 대한 탑저 농도 계단 변화 응답.

DDRD구조와 SDRD구조의 성능에 대한 비교는 현재로서 크게 개선되기보다는 최대편차를 줄일 수 있는 정도로 그 효과가 미미하나 앞으로의 연구를 통하여 발전 가능성이 있다고 할 수 있다. 다른 측면으로 이 연구에서 대상으로 한 공정의 특성을 고려하여 볼 때, SDRD 구조가 워낙 좋은 성능을 보이므로 DDRD 구조에서 개선되는 정도가 미약하다고 볼 수 있으므로 다른 공정을 대상으로 연구를 더 해보는 것이 바람직하다고 생각한다. 앞으로의 연구과제는 DDRD의 성능을 향상시키고 현재 이 구조가 가지고 있는 파라미터 민감성을 개선하는 것이라 할 수 있다.

참고문헌

1. Häggblom, K. E. and Waller K. V.: *AIChE J.*, **34**, 1634(1988).
2. Häggblom, K. E. and Waller K. V.: *AIChE J.*, **36**, 1107(1990).
3. Yang, D. R., K. V. Waller, D. E. Seborg and D. A. Mellichamp: *AIChE J.*, **36**, 1391(1990).
4. Yang, D. R. Ph. D Dissertation, Univ. of California, Santa Babara(1990).
5. Moonyong Lee and Sunwon Park: *AIChE J.*, **37**, 1725(1991).