

## 3 by 3 제어루프를 적용한 에너지 절약형 증류탑의 제어구조에 관한 연구

박창원, 정승배, 박재웅, 김영한<sup>1</sup>, 황규석\*  
 부산대학교, <sup>1</sup>동아대학교  
 (kshwang@pusan.ac.kr\*)

## Study on a Energy-Efficient Distillation of Control System applying 3 by 3 Control Loop

Chang Won Park, Seung Bae Jung, Jae Woong Park, Young Han Kim<sup>1</sup>, Kyu Suk Hwang\*  
 Pusan National Univ., <sup>1</sup>Dong-A Univ.  
 (kshwang@pusan.ac.kr\*)

## 서론

석유 및 화학공정 산업은 에너지 대량소비산업에 속하므로 제품의 생산비 절감 측면에서 에너지 절약형 증류시스템인 열복합 증류탑(Fully Thermally Coupled Distillation Column: FTCDC)의 상업적 효용가치는 매우 크다 할 수 있다. Hexane 공정은 정유공정에서 상압증류를 거쳐 얻어진 경질나프타에서 Hexane을 분리해내는 공정이다.

본 연구에서는 열복합 증류탑을 이용한 실제 Hexane 공정에 응용가능 하도록 4가지의 제어구조의 동적거동과 제어성능을 분석하고 최적화된 3×3제어구조를 설계하는 것을 목표로 한다.

## 본론

## 1. 시스템 구조 설계 및 모델링

열복합 증류탑(Fully Thermally Coupled Distillation Column: FTCDC)은 전처리 탑(prefractionator column)과 주탑(main column)으로 이루어져 있다. 두 탑의 단에서 액체조성은 다성분계 평형증류 잔류곡선과 유사하다면, 증류공정의 열역학적 효율은 이상적이라는 개념이 이전의 설계방식을 도입하였다. 원료 공급단의 조성이 원료의 조성과 비슷해야만 이상적인 효율을 얻을 있는데 단수가 무한하지 않으므로 잔류곡선과 유사한 조성은 실제 증류탑에서 얻을 수 없다. 우선 전처리 탑의 구조 설계는 원료조성에 원료 공급단의 조성을 맞추기 위해 물질수지식을 이용하여 계산한다.

$$x_{n,i}^H = (V_2 y_{n-1,i}^H - F_{z_{\gamma_1,i}}) / L_2 \quad (1)$$

액체, 기체 유량은 통상적인 설계방법에 따라 최소유량의 1.5배하는 룰을 적용하여 구하며, 일정 물넘침이 가정되었다. 최적 분리비  $\beta$ 는 아래의 목적식으로 구할 수 있다.

$$\beta = \frac{a_B - a_C}{a_A - a_C} \quad (2)$$

전처리 탑의 원료 공급단 아래의 증기조성은 원료조성에서 얻어진 물질 수지로 계산한다. 여기서는 증기조성을 얻을 수 있다.

$$y_{n,i}^H = (L_3 x_{n-1,i}^H - F_{z_{\gamma_2,i}}) / V_3 \quad (3)$$

전처리 탑과 주탑이 연결되는 단은 다음의 목적식으로 구할 수 있으며, 하첨자 m,n은

전처리 탑과 주탑의 단수를 뜻 한다.

$$\text{Min}_{m,n} \sum_i |x_{n,i} - x_{m,i}^H| Fz_i \gamma_{I,i} \quad (4)$$

전처리 탑과 연결되어 있는 단들에서 주탑의 양쪽 끝단까지의 액체조성은 제품규격에 맞을 때까지 반복하여 계산한다.

$$x_{NR,i} = (V_4 y_{NR+1} + V_2 y_{1,i}^H - Fz_i \gamma_{4,i}) / L \quad (5)$$

전처리 탑의 단수 역시 통상적인 설계방법에 따라 단수에 1.7을 곱하였다.

## 2. 제어구조 설계 및 제어성능 평가

RGA Matrix를 바탕으로 제어구조를 설계하고 제어성능을 평가하여 최적화된 제어구조를 찾는다.

Table 1. 3×3 matrix table

	u1	u2	u3
y1	$K_{11} = \left(\frac{\Delta y_1}{\Delta u_1}\right)_{u_{2,3}}$	$K_{12} = \left(\frac{\Delta y_1}{\Delta u_2}\right)_{u_{1,3}}$	$K_{13} = \left(\frac{\Delta y_1}{\Delta u_3}\right)_{u_{1,2}}$
y2	$K_{21} = \left(\frac{\Delta y_2}{\Delta u_1}\right)_{u_{2,3}}$	$K_{22} = \left(\frac{\Delta y_2}{\Delta u_2}\right)_{u_{1,3}}$	$K_{23} = \left(\frac{\Delta y_2}{\Delta u_3}\right)_{u_{1,2}}$
y3	$K_{31} = \left(\frac{\Delta y_3}{\Delta u_1}\right)_{u_{2,3}}$	$K_{32} = \left(\frac{\Delta y_3}{\Delta u_2}\right)_{u_{1,3}}$	$K_{33} = \left(\frac{\Delta y_3}{\Delta u_3}\right)_{u_{1,2}}$

위 Table 1.에서 y는 measurement이고 u는 manipulated input을 의미한다.

$$\Lambda(G) = G \circ G^{-T} \quad (6)$$

$$= \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{pmatrix}$$

3×3 matrix table을 이용하여 Steady-State Relative Gain Array를 구한다. 여기서 연산자는 element by element multiplication(the Hadamard or Schur product)를 나타내고,  $G^{-T}$ 는  $G^{-1}$ 의 transpose matrix를 뜻 한다.

## 결론 및 고찰

### 1. Open Loop 상태에서의 동적거동 응답해석

Side draw rate의 ±3% 계단변화에 대한 n-Pentane, n-Hexane, n-Heptane의 조성변화응답이다. Fig 1.을 통해서 side draw rate가 n-Pentane과 n-Hexane의 조성보다는 n-Heptane 조성변화에 훨씬 강한 영향을 준다는 것을 의미한다. 그리고 n-Pentane과 n-Hexane의 조성응답이 역응답을 나타내는 것을 확인 할 수 있다. Side product의 n-Hexane 조성은 side draw rate를 이용하여 제어 시 효율적이지 못하는 것을 알 수 있다.

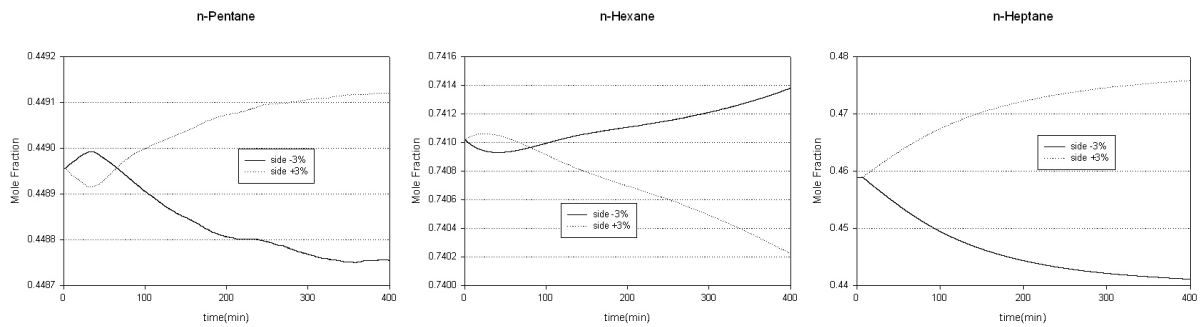


Fig. 1. The responses of overhead, side draw and bottom product specifications with step changes

## 2. LV3V 구조의 제어성능 분석

중간제품조성에 대한 manipulated input을 vapor draw rate로 제어를 했을 경우, manipulated input matrix, gain matrix와 RGA matrix를 구하면 아래와 같다.

$$u = \begin{bmatrix} L \\ V_3 \\ V \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} x(n-Pentane) \\ x(n-Hexane) \\ x(n-Heptane) \end{bmatrix}$$

$$G3 = \begin{bmatrix} 489.2 & -25 & -473 \\ 135 & 268.5 & 319.3 \\ -61 & 10.1 & 1540.05 \end{bmatrix}$$

$$\Lambda(G3) = \begin{bmatrix} 1.0137 & 0.0287 & -0.0424 \\ 0.0230 & 0.9825 & -0.0055 \\ -0.0367 & -0.0112 & 1.0479 \end{bmatrix}$$

Gain matrix의 값을 보면 vapor flow rate는 상대적으로 중간제품의 조성에 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있으며, RGA 값 1.0137, 0.9825, 1.0479 이 1에 가깝기 때문에 n-Pentane 조성을 reflux rate로, n-Hexane 조성을 vapor draw rate로, n-Heptane 조성을 vapor boilup rate로 조절하도록 짝지어 연결하는 것이 가장 적절하다. 또한 LSV, LL<sub>2</sub>V, LVS와

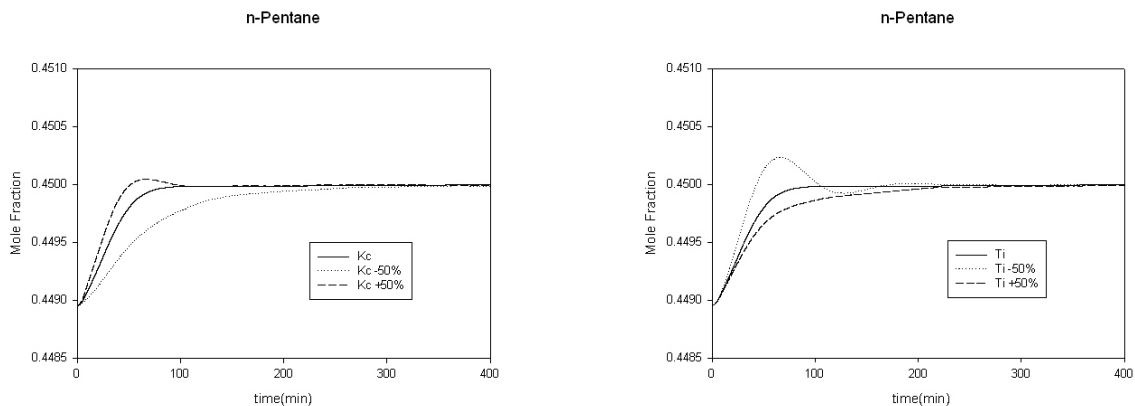


Fig. 2. n-Pentane mole fraction control by using reflux flow rate

비교하였을 경우, 그 값이 상대적으로 매우 작기 때문에 다른 control loop들이 LV3V제어 구조에서 제어동작을 취할 때 공정에 영향을 아주 작게 미친다는 것을 알 수 있고, 제어

가 잘되리라 생각된다.

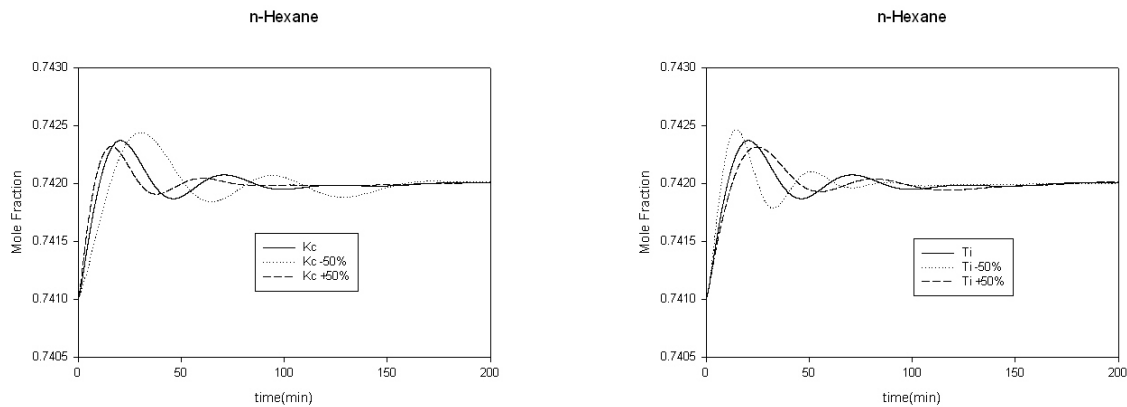


Fig. 3. n-Hexane mole fraction control by using vapor flow rate

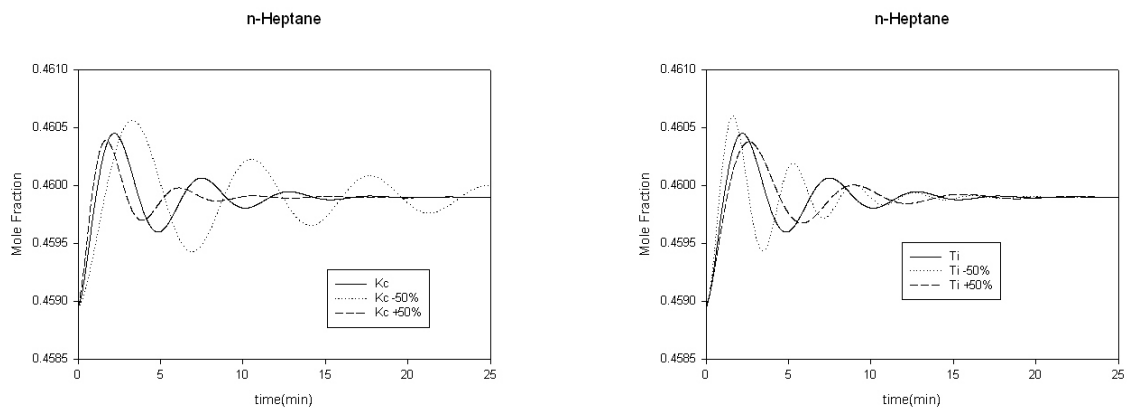


Fig. 4. n-Heptane mole fraction control by using reboiler heat duty

hexan 제조공정에서 열복합 증류탑은 LSV제어구조에서 side draw rate를 사용하여 n-Hexane조성을 제어했을 때, n-Hexane조성보다는 n-Heptane조성에 더 많은 영향을 줄 뿐만 아니라 제어 동작·성능이 떨어진다. 이런 문제점을 해결하기 위해 새로운 제어구조인 LL<sub>2</sub>V, LVS, LV<sub>3</sub>V을 Gain matrix와 RGA matrix를 이용하여 제어구조의 연관성을 확인 하고, 이를 바탕으로 제어성능을 상업용 공정모사기 Aspen Hysys를 이용하여 확인 하였다. LV<sub>3</sub>V제어구조를 동적거동을 바탕으로 3×3 제어구조를 제안하며, reflux flow rate는 n-Pentane, vapor draw rate는 n-Hexane, vapor boil-up rate는 n-Heptane의 조성을 각각 제어 하는 것이 가장 효율적인 제어구조임을 확인 할 수 있었다.

### 참고문헌

1. R. Agrawal, Z.T. Fidkowski, *AIGIE J.* 45 (1999)
2. Kim, Y.H, *J. Chem. Eng., Japan*, **36**(12), 1503-1509(2003)