

## 변형 열복합 증류탑의 동적 특성

황규석\* · 성익기 · 김영한†

동아대학교 화학공학과  
604-714 부산시 사하구 하단동 840번지  
\*부산대학교 화학공학과  
609-735 부산시 금정구 장전동 산 30번지  
(2009년 3월 4일 접수, 2009년 5월 4일 채택)

### Dynamic Behavior of a Modified Thermally Coupled Distillation Column

Kyu Suk Hwang\*, Ick Gi Sung and Young Han Kim†

Department of Chemical Engineering, Dong-A University, 840, Hadan-dong, Saha-gu, Busan 604-714, Korea  
\*Department of Chemical Engineering, Pusan Natl. University, San 30, Jangjun-dong, Gumjung-gu, Busan 609-735, Korea  
(Received 4 March accepted 4 May 2009)

#### 요 약

보통의 2탑 증류시스템에서 사용하는 2기의 증류탑을 활용하여 열복합 증류시스템을 구성하고, 제안된 증류탑의 운전특성을 알아보기 위하여 시스템의 동특성을 조사하였다. 계단응답을 이용한 3가지 제품의 제어 방안을 알아내기 위하여, 상부제품의 유량, 중간제품의 유량, 재비기의 증기발생량을 변화하였다. 그 결과로부터 3×3의 제어구조를 제시하였다. 제안된 제어시스템에 PI 제어를 사용하였을 때의 제어성능을 조사한 결과 하부제품의 농도관리가 가장 어려움을 알 수 있었으나, 본 연구의 증류시스템 운전이 가능함을 알았다.

**Abstract** – A thermally coupled distillation system is constructed using two columns used in a conventional two column system, and its operability is examined by investigating the dynamic behavior. For the control of three product specifications, the step response test is performed and a 3×3 control structure using flow rates of overhead and side products and vapor boilup is suggested. The performance of the proposed control system indicates that the specification control of bottom product is the most difficult but the operation of the proposed system is available.

Key words: Energy-Efficient Distillation, Thermally Coupled Distillation, Dynamic Behavior, Distillation Column Operation

#### 1. 서 론

증류탑 내 액의 농도분포를 평형증류와 유사하게 유지될 수 있도록 조작하면 증류탑 효율이 향상되어 증류조작의 에너지 소모를 최소로 줄일 수 있다. 이러한 원리를 활용한 열복합 증류탑은 전 처리탑과 주탑 사이에 양방향 흐름이 있도록 구성된 것으로 재래식 증류 시스템보다 적은 양의 에너지를 소모한다. 분리벽형 증류탑은 실제 현장에서 활용하는 열복합 증류탑의 일종이며 널리 응용되고 있다. 분리벽형 증류탑은 1개의 탑 내를 분할하여 전처리탑과 주탑을 일체형으로 구성한 것으로, 전처리탑과 주탑 사이의 액체와 증기의 흐름의 분할 비를 제어하기 불가능하기 때문에 제품 조성을 원활하게 조절하기 어렵다[1]. 그러나 증류시스템의 설계 시 제품의 품질을 충분하게 감안한 설계를 한다면 제어가 다소 어려워도 필요한 제품을 생산하는 데는 큰 문제가 되지 않는다. 이러한 설계 지침에

따라 설계된 많은 분리벽형 증류탑이 유럽의 여러 화학공장에서 활발하게 활용되고 있어 열복합 증류탑의 높은 에너지의 효율성이 입증되었다[2].

열복합 증류탑의 응용을 촉진하기 위하여 증류탑의 운전에서 생기는 여러 가지 문제를 보완하는 많은 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 기존의 열복합 증류탑의 주탑을 중간제품 생산단을 기준으로 상부탑과 하부탑으로 분리하여 열교환기로 이들을 연결한 증류 시스템을 구성한 경우, 열복합 증류탑의 높은 증류효율을 유지하면서 운전성을 개선할 수 있음을 알 수 있었다[3]. 또, 주탑을 상하부로 분리하고 증기와 액의 흐름을 외부로 연결한 증류 시스템에서 여러 가지 운전방법에 따라 제품의 조성이 어떻게 변화하는지를 조사하여 운전성이 개선됨을 발표하였다[4]. 그러나 이들 열복합 증류탑은 완전히 새로운 증류시스템을 구성하여야 하기 때문에 새로운 시설비의 투자가 필요하고 설비의 대대적인 교체를 하여야 하는 문제를 가지고 있다. 기존의 2탑 증류시스템에서 사용하는 2기의 증류탑을 그대로 사용하면서 새로운 탑을 추가하는 방식의 열복합 증류탑은 신규 시설비를 줄일 수 있고 설비의 부분교체만으로

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: yhkim@mail.donga.ac.kr

‡ 이 논문은 부산대학교 박상욱 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

열복합 증류 시스템의 에너지 절감효과를 얻을 수 있으며 운전성을 개선할 수 있는 방안이 제시되었다[5].

본 연구에서는 기존 사용하는 2기의 증류탑을 이용하여 구성된 새로운 증류시스템의 동적특성을 조사하고자 한다. 제안된 증류 시스템의 수치모사를 이용하여 계단응답과 PI 제어 성능을 알아봄으로써 운전성 개선효과를 검토하였다.

### 2. 증류 시스템의 구조와 설계

나프타 개질공정에서 유출된 유분은 지방족 유기물과 방향족 유기물이 혼합되어 있어 sulfolane 추출공정에서 방향족 유기물을 분리한다. 방향족 유기 혼합물을 처리하는 첫 번째 공정이 BTX 분별 공정이다. 이 공정의 첫 번째 증류탑에서 벤젠을 상부제품으로 생산하고 하부제품을 두 번째 증류탑에 공급하여 상부제품으로 톨루엔을 생산하고 자일렌의 혼합물을 하부제품으로 생산하는 공정이다. 이 공정은 전형적인 2성분 증류탑의 연속배치를 사용하므로 증류탑 효율이 낮아 에너지 소모량이 크고 하루에 처리하는 양이 많기 때문에 대량 에너지 소모공정이다. 3성분 혼합물을 보통의 2성분 증류탑으로 처리하면 탑 내 액의 조성분포는 3성분 평형증류 곡선과 많은 차이를 가진다. 이것은 원래 3성분 혼합물인데 2성분 증류탑으로 처리하기 때문에 2개 성분의 혼합물을 1개의 성분으로 취급할 수 밖에 없어 증류탑 효율이 최고인 3성분 평형증류 곡선과 근접되게 시스템을 설계할 수 없다. 열복합 증류탑은 1기의 증류탑에서 3가지 성분을 각각 분리하기 때문에 증류탑 효율이 높은 평형증류 곡선에 유사하게 탑 내 액의 조성분포를 가지도록 증류탑을 설계할 수 있다. 그러나 원료가 공급되는 증류탑의 중간부분에서 고농도의 중간비점 성분을 생산하여야 하므로 원료와 중간제품을 분리하여야 한다. 즉 증류탑의 중간부분을 2개 영역으로 나눌 필요가 있고 이렇게 나눈 것을 분리벽형 열복합 증류탑이라고 한다.

분리벽형 증류탑의 운전성을 개선하고 기존의 2탑 증류시스템에서 사용하는 2기의 증류탑을 활용하면 Fig. 1과 같은 구조의 증류 시스템을 구성할 수 있다. 여기서 증류탑 C1과 C2는 기존의 증류탑이고 증류탑 E1과 E2는 추가로 연결하는 증류탑이다. 분리벽형 증류탑의 중간부분에서 분리한 영역을 2기의 증류탑으로 구성된 증류 시스템이기 때문에 분리벽형 증류탑의 설계와 동일한 방법으로 증류탑을 설계할 수 있다. 상업용 설계 프로그램을 이용하여 보통의 증류 시스템을 설계하는 경우 원료와 제품의 조성을 알고 탑의 압력과 환류비를 결정하면 쉽게 증류탑을 설계할 수 있다. 그러나 열복합형 증류탑은 전처리탑과 주탑이 양방향 흐름으로 연결되어 있기 때문에 이들 흐름의 조성과 유량에 관한 자료가 없으면 일반적인 증류탑의 설계방법을 응용할 수 없다.

그러므로 증류 시스템의 구조적 자료를 얻은 후, 상업용 프로그램을 이용하여 운전자료를 계산하는 방법을 사용하면 보다 빠른 시간에 결과를 얻을 수 있다. 열복합 증류탑이 3성분 평형증류의 곡선과 유사한 증류탑 내 액조성 분포를 가지므로, 최고비점 성분과 최저비점 성분 사이를 연결하는 3성분 잔류농도 곡선을 이용한다. 여러 개의 잔류 곡선 중 원료의 조성과 중간제품의 조성에 가장 근접하는 2개의 잔류농도 곡선을 선택하고, 우선 원료의 농도로부터 전처리탑의 상부영역 조성을 다음 식으로 연속 계산한다.

$$x_{n-1,j} = K_{n,j}x_{n,j} / \sum_j K_{n,j}x_{n,j} \tag{1}$$

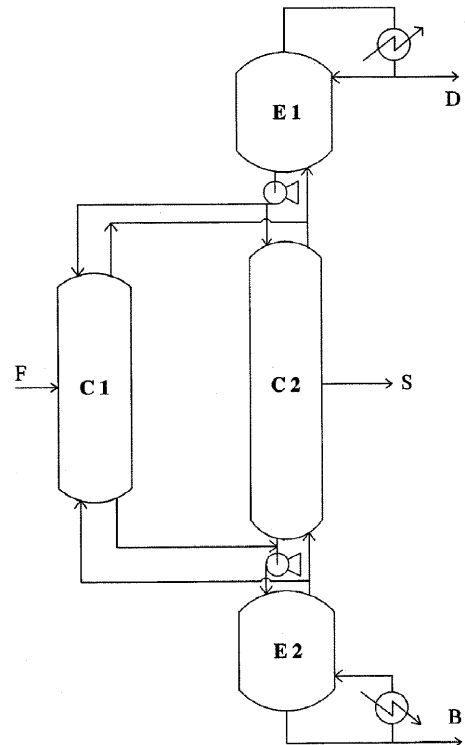


Fig. 1. Schematic diagram of the proposed fully thermally coupled distillation column.

여기서 첨자 n은 상단부터 계산한 단의 수를 나타내고 j는 성분의 번호이다. 즉 원료 공급단에서 시작하여 계단식으로 한단씩 계산한다. 비슷한 방법으로 원료 공급단부터 하부영역은 다음 식으로 계산한다.

$$x_{n+1,j} = x_{n,j} / [K_{n+1,j} \sum_j (x_{n,j} / K_{n+1,j})] \tag{2}$$

계산의 순서는 식 (1)과 동일하나 계산식에 계산하려는 증류단에서의 평형상수를 필요로 하기 때문에 반복계산을 할 필요가 있다. 주탑에서도 동일한 방법을 적용하는데 원료의 농도 대신 중간제품의 농도를 사용한다. 중간제품 생산단을 중심으로 상부단을 계단식으로 한단씩 계산하여 상부제품의 농도가 얻어질 때까지 계산하고, 하부단을 마찬가지로 한단씩 계산하여 하부제품의 농도가 얻어질 때까지 계산한다. 이렇게 계산하여 얻어진 증류탑 구조는 식 (1)과 (2)가 평형증류에서의 계산식임을 감안하면 이상적인 증류효율을

Table 1. Design results of the proposed distillation system

Name	Proposed column			
	Prefract.	Up_main	Mid_main	Low_main
Structural				
number of tray	45	15	38	35
feed/side product	25		19	
Operating feed(kmol/h)	1574			
overhead(kmol/h)		221.9		
bottom(kmol/h)				842.2
side(kmol/h)			509.8	
reflux(kmol/h)	365.2	1672	1233	2731
vapor boilup(kmol/h)	868.8	1810	1020	1901
heat duty(GJ/h)				70.90

**Table 2. Specifications of feed and products**

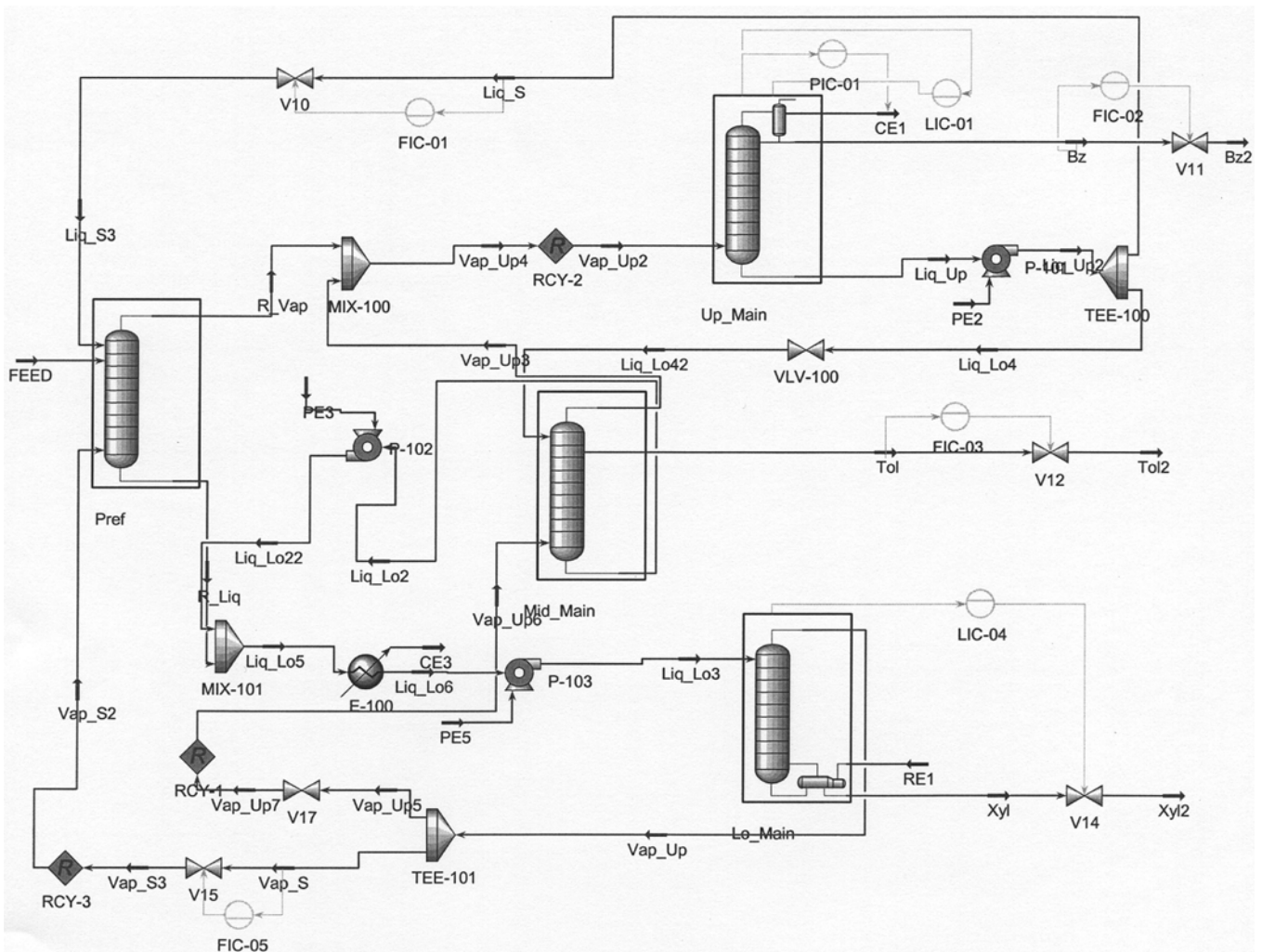
Component	Feed	Products		
		Overhead-1	Overhead-2	Bottom
<b>(Light)</b>				
n-Pentane	0.0011	0.0011	0.0000	0.0000
n-Hexane	0.2648	0.2640	0.0000	0.0000
n-Heptane	0.0226	0.0196	0.0031	0.0000
n-Octane	0.2005	0.0000	0.1996	0.0009
n-Nonane	0.4206	0.0000	0.0007	0.4199
Benzene	222.44	221.67	0.7673	0.0000
<b>(Intermediate)</b>				
Toluene	508.72	0.0191	508.37	0.3318
<b>(Heavy)</b>				
p-Xylene	117.89	0.0000	0.1471	117.74
m-Xylene	257.15	0.0000	0.2803	256.87
o-Xylene	112.56	0.0000	0.0134	112.55
E-Benzene	11.663	0.0000	0.0584	11.605
n-PBenzene	0.3798	0.0000	0.0000	0.3798
1M2-EBenzene	23.240	0.0000	0.0000	23.240
123-MBenzene	261.23	0.0000	0.0000	261.23
1234-M-BZ	57.841	0.0000	0.0000	57.841
<b>Total</b>	<b>1574.0</b>	<b>222.00</b>	<b>509.84</b>	<b>842.20</b>

가지는 증류탑에 대한 것이므로, 실제 증류탑은 통상의 설계기준을 감안하여 여기서 계산한 증류단수의 2배를 사용한다. 전처리탑과 주탑의 연결단은 두 탑의 조성이 유사한 농도를 조사하여 혼합이 가장 적게 발생하는 곳을 선정하면 된다.

증류탑의 구조적 자료 즉, 전처리탑과 주탑의 단수, 원료의 공급 단과 제품의 생산단, 전처리탑과 주탑의 연결단 등을 알면, 상업용 증류탑 설계 프로그램을 사용하여 요구되는 제품의 규격을 만족하는 증류탑의 운전조건을 반복계산으로 계산해 낼 수 있다. 본 연구에서는 기존 증류탑 2기를 사용하였기 때문에 전처리탑과 주탑의 중간부분의 단수 계산을 약간 변경하여 Table 1에 정리한 결과를 사용하였다. 또 원료와 제품의 조성을 Table 2에 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

통상의 2탑 증류시스템을 열복합형으로 개편한 증류탑의 운전성을 조사하기 위하여 동적특성을 살펴보았다. Fig. 2는 동특성을 알아보기 위하여 HYSYS를 사용한 공정의 흐름도이다. 증류 시스템의 구조적 자료와 운전변수는 Table 1에 정리되어 있으며 정상상태 운전에서 원료와 제품의 성분별 유량이 Table 2에 나타나 있다. 동특성 조사에서는 공정의 압력이 정상상태와 약간 다르기 때문에 제품의



**Fig. 2. A HYSYS process diagram of the proposed fully thermally coupled distillation column.**

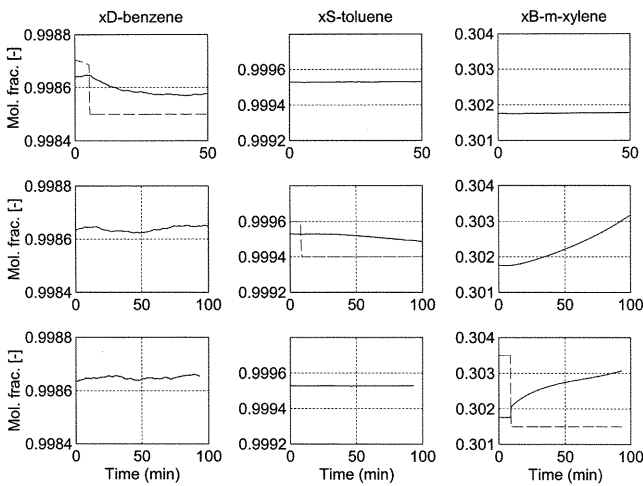


Fig. 3. Step responses of three products.

성분별 유량에 변화가 있으나 특성 조사에는 큰 영향이 없다. 증류탑의 안정한 운전을 위하여 상부주탑의 상단 압력을 일정하게 유지하는 것이 가장 중요하며, 냉각기 내의 액위가 간접적인 영향을 주기 때문에 PIC-01과 LIC-01의 제어루프를 설치하였다. 재비기의 액위도 비슷한 영향을 가지므로 LIC-04의 제어루프를 설치하였고, 4

개의 유량제어 루프를 추가로 설치하여 공정이 안정되게 하였다.

제한한 열복합 증류시스템의 제어방식을 결정하기 위하여 3가지 제품의 농도에 대한 계단응답을 조사하였다. 상부제품과 중간제품은 각각 벤젠과 톨루엔이 주성분이므로 이들 농도를 대상으로 하였고 하부제품은 자일렌 이성체의 혼합물이 주성분 중 농도가 가장 높은 m-자일렌의 농도를 대상으로 하였다. 계단응답의 결과는 Fig. 3에 정리되어 있는데, 상단의 3개의 그림은 상부제품의 유량을 14% 감소시켰을 때의 변화이다. 첫 번째 그림의 점선은 유량변화를 표시한 그림이다. 상부제품의 생산유량이 감소함에 따라 상부제품의 벤젠농도가 감소하였다. 이 때 중간제품과 하부제품의 농도변화는 관측되지 않았다. 중간단의 3개의 그림은 전처리탑의 증기유량을 2.8% 감소하였을 때의 각 제품의 계단응답이다. 유량의 감소에 따라 완만한 변화이지만 중간제품의 톨루엔 농도가 감소함을 알 수 있다. 동시에 상부제품은 큰 변화가 없으나 하부제품의 자일렌 농도가 많이 변화하였다. 하단의 3개의 그림은 재비기의 열공급을 0.3% 감소하였을 때의 응답이다. 상부제품과 중간제품의 농도가 거의 변화하지 않으면서 하부제품의 자일렌 농도가 약간 증가함을 알 수 있다. 이러한 계단응답의 결과를 바탕으로 상부제품의 농도를 상부제품의 유량으로, 중간제품의 농도를 전처리탑의 증기유량으로, 하부제품의 농도를 재비기의 열공급량으로 제어하는 3×3 제어구조를 완성하였다.

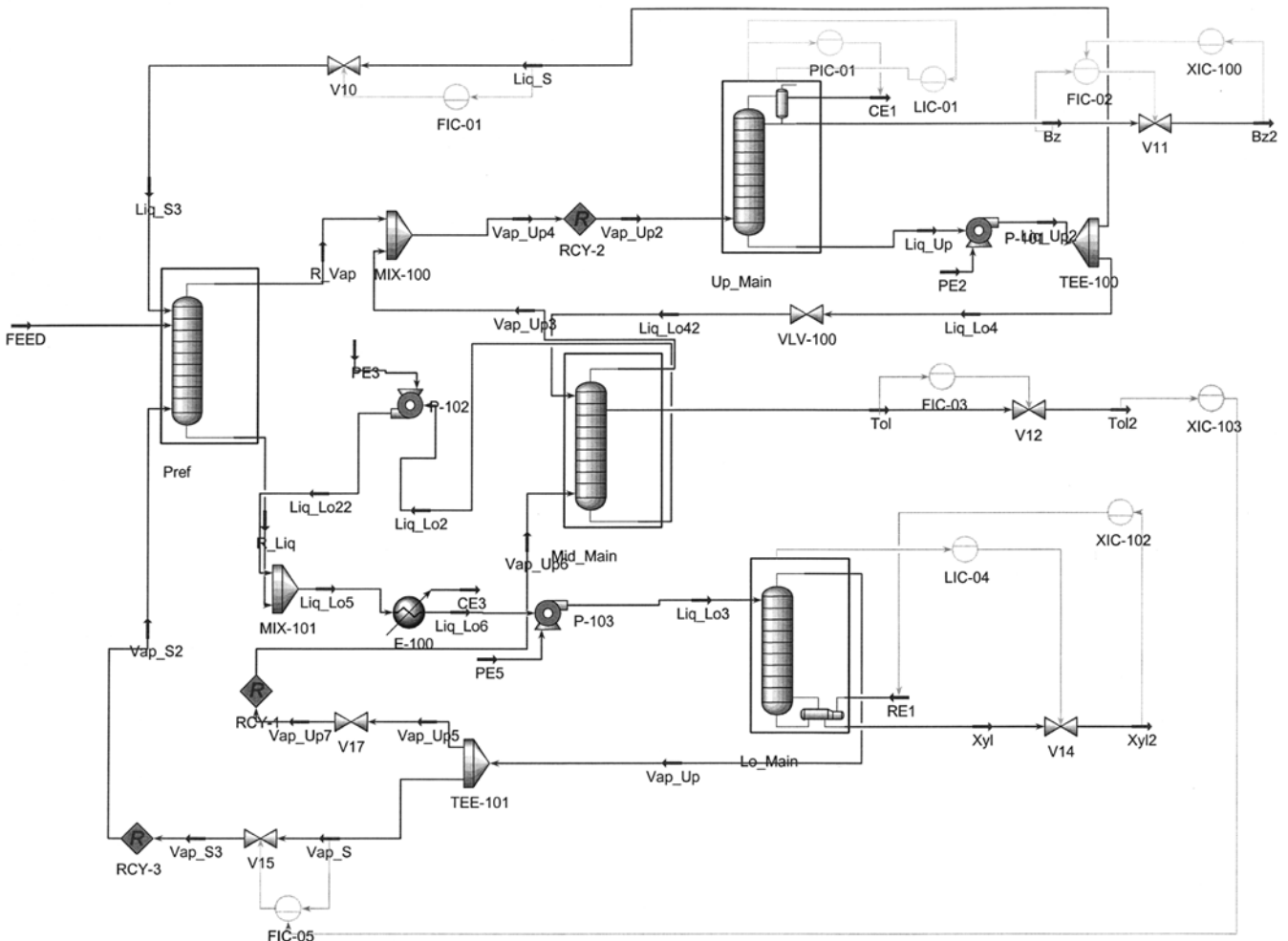


Fig. 4. A HYSYS process diagram of the proposed fully thermally coupled distillation column with three PI control loops.

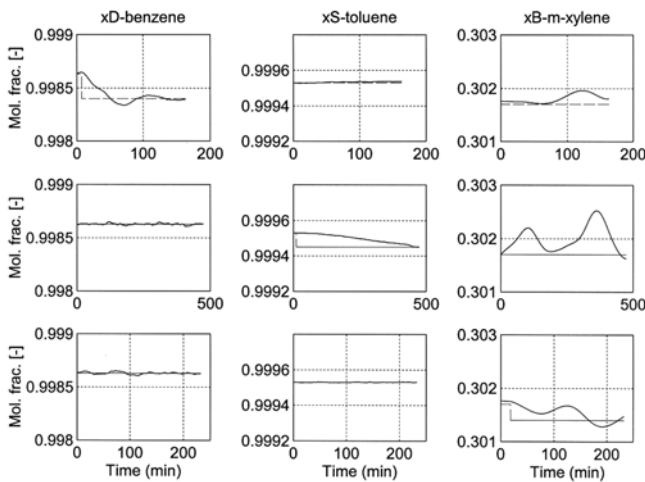


Fig. 5. Control results of product composition changes.

제시된 제어구조에 3개의 PI 제어루프를 연결하여 Fig. 4의 제어 공정을 구성하고 제어특성을 조사하였다. Fig. 5는 설정치 변화에 따른 제어특성을 나타낸 그림이다. 상부제품의 벤젠 농도를 감소하였을 때의 응답이 상부 3개의 그림이다. 하부제품의 자일렌 농도가 약간 변화하였으나 벤젠의 농도가 설정치에 잘 맞음을 알 수 있다. 중간의 3개의 그림에서 중간제품의 톨루엔 농도를 변화하였을 때 하부제품의 자일렌 농도가 다소 많이 흔들림을 알 수 있었으나 상부제품은 제어가 양호함을 알 수 있다. 하단의 3개의 그림에서 하부제품의 자일렌 농도가 변화할 때 상부제품과 중간제품의 농도가 안정하며 하부제품의 농도만 설정치를 추적함을 알 수 있다. 이상의 제어성능 검토에서 하부제품의 자일렌 농도조절이 가장 어려움을 알 수 있었으나 제시된 열복합 증류탑의 운전이 가능함을 보였다.

### 5. 결 론

기존의 3성분 분리공정인 2탑 증류시스템에서 사용하는 2기의 증류탑을 활용한, 열복합 증류탑의 운전특성을 알아보기 위하여 시스템의 동특성을 조사하였다. 상부제품의 유량, 중간제품의 유량, 재비기의 증기발생량에 대한 3가지 제품의 농도변화를 관찰하는 계단

응답을 이용하여 3×3의 제어구조를 제시하였고 PI 제어를 사용하였을 때의 제어성능을 조사한 결과 하부제품의 농도관리가 가장 어려움을 알 수 있었으나, 제안된 증류시스템의 운전이 가능함을 알았다.

### 감 사

본 연구는 2008년도 동아대학교의 연구지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 사용기호

- K : equilibrium constant [-]
- x : liquid mole fraction [-]

### 이래첨자

- j : component [-]
- n : tray number [-]

### 참고문헌

1. Abdul Mutalib, M. I. and Smith, R., "Operation and Control of Dividing Wall Distillation Columns, Part 1: Degrees of Freedom and Dynamic Simulation," *Trans. IChemE, Part A*, **76**, 308-318 (1998).
2. Schultz, M. A., Stewart, D. G., Harris, J. M., Rosenblum, S. P., Shakur, M. S. and O'Brien, D. E., "Reduce Costs with Dividing-Wall Columns," *Chem. Eng. Progress*, **98**, 64-71(2002).
3. Kim, Y. H., "An Alternative Structure of a Fully Thermally Coupled Distillation Column for Improved Operability," *J. Chem. Eng., Japan*, **36**, 1503-1509(2003).
4. Kim, Y. H., "Operability Improvement in a Fully Thermally Coupled Distillation System with Separated Main Columns," *J. Chem. Eng., Japan*, **39**, 284-291(2006).
5. Lee, M. Y. and Kim, Y. H., "Design of Thermally Coupled Distillation Process Utilizing Existing Columns," *Korean Chem. Eng. Res.*, **46**, 1017-1022(2008).