

BTX 분리를 위한 효율적인 증류 공정의 동적 모사에 관한 연구

김미희, 박재웅, 김영한¹, 황규석*
 부산대학교 화학공학과, ¹동아대학교 화학공학과
 (kshwang@pusan.ac.kr*)

Study on Dynamic Simulation of an Efficient Distillation Column For BTX Separation

Mi hee Kim, Jae Woong Park, Young Han Kim¹, Kyu Suk Hwang*
 Department of Chemical Engineering, Dong-A University
¹Department of Chemical Engineering, Pusan National University
 (kshwang@pusan.ac.kr*)

서론

열복합 증류탑(Fully Thermally Coupled Distillation Column: FT CDC)은 에너지 효율적 측면에서는 매우 큰 장점을 가지고 있으나 운전이 어렵기 때문에 실제 공정에 활용이 잘 되지 않고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 열복합 증류탑의 최적의 설계와 제어가 이루어져야 한다. 이는 기존의 증류탑에 비해 이론적으로 약 30%의 에너지 절감효과를 가진다고 알려져 있다. 증류는 설계와 운전이 용이하며 구조가 단순하고 투자비용이 적으며 산업적 위험도가 작은 장점을 가지고 있으나 에너지 효율이 매우 낮다는 단점을 가지고 있다. 이런 단점을 극복하기 위해 증류기술을 부분적으로 대체할 수 있을지 몰라도 완전히 대체할 수 있는 기술은 현재와 향후에도 당분간은 불가능할 것이라는 견해가 지배적이다. 그러나 공정자체를 개선하여 에너지를 절감한다면 그 효과는 부분적으로 대체된 방법들 보다 매우 큰 절감효과를 얻을 수 있다. 기존의 제어구조에서 가능한 4가지의 제어구조의 동적거동을 분석하여 가장 적절한 3X3 제어구조를 설계하는 것을 목표로 한다. 기존의 제어구조에 대한 open loop 상태에서 동적응답을 해석하여, 제어성능의 문제점과 이를 해결하기 위한 몇 가지 제어구조를 제안하였다. 열복합 증류탑의 구조적 설계는 초기 운전 정보를 제공하며, 동적 모사를 통한 열복합 증류탑의 제어 성능이 평가 될 수 있다. 동적 모사를 통한 simulation은 column의 가능한 운전 계획과 공정의 안정성을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 석유화학 공장에서의 BTX(Benzene, Toluene, Xylene)의 분리 공정을 대상공정으로 하여 열복합 증류탑을 상업용 공정 모사기 Aspen Hysys를 이용하여 공정을 설계한다.

본론

1. Steady State Simulation

구조적 설계에서 얻어진 데이터들과 초기 운전조건을 가지고 steady state simulation을 수행하였다. 원하는 제품 조성을 얻기 위해 prefractionator와 main column의 단수 및 연결단의 위치가 try & error를 통해 조정되었다. Prefractionator의 단수는 18단에서 21단, main column의 단수는 82단에서 89단으로 조정되었다. 상부연결단은 58단에서 74단으로 조정되었고, 하부연결단은 초기단으로 실행하였다.

Table 1. Compositions of products

Component	FTCDC		
	Overhead	Side	Bottom
(Light)			
benzene	0.9998	0.0028	0.0000
dimethyl c-pentane	0.0001	0.0000	0.0000
(Intermediate)			
methyl c-hexane	0.0000	0.0000	0.0000
toluene	0.0000	0.9935	0.0087
n-octane	0.0000	0.0001	0.0000
(Heavy)			
ethylbenzene	0.0000	0.0007	0.0390
p-xylene	0.0000	0.0009	0.1520
m-xylene	0.0000	0.0018	0.3383
o-xylene	0.0000	0.0002	0.1592
n-nonane	0.0000	0.0000	0.0000
n-pentyl benzene	0.0000	0.0000	0.0008
methyl-ethyl benzene	0.0000	0.0000	0.0689
tri-methyl benzene	0.0000	0.0000	0.2012
methyl-n-propyl bz	0.0000	0.0000	0.0015
di-ethyl benzene	0.0000	0.0000	0.0009
o-cymen	0.0000	0.0000	0.0109
tetra-methyl benzene	0.0000	0.0000	0.0126
penta-methyl benzene	0.0000	0.0000	0.0059

2. Dynamic Simulation

Dynamic simulation은 시간의 함수로서 공정과 공정제어가 다양한 공정 upset에 대해 어떻게 응답하는 가를 예측하는 공정엔지니어링 설계도구이다. Dynamic Simulation을 수행하기 위해 우선 정상상태 공정이 다이나믹 공정으로 재구성 되어야 한다.

정밀한 설계와 FTCDC의 동적 모사 사이의 차이는 조성 계산의 방법이다.

동적 모사에서 조성은 단에서의 액체 holdup의 비정상 상태 성분 물질 수지로부터 계산된다. 각 단위 공정들은 실제 공장에서의 유량과 압력을 적용시킬 수 있게 size 되어야 한다. 다이나믹 운전을 위해서는 공정안의 모든 밸브의 sizing이 필요하며, Aspen Hysys에서는 valve sizing을 automation 할 수 있다. Valves, Controllers, 각각의 unit sizing을 통하여 최종 dynamic simulation을 실행한 결과가 Fig.1에 나타나있다. 본 연구에서는 정상상태 공정에 9개의 제어기와 9개의 밸브를 추가하여 동적모사를 수행하였다.

Table 2. Reboiler and condenser sizing parameters

	Reboiler	Condenser
Dimeter(ft)	8.432	9.652
Length(ft)	12.65	14.48
Volumn(ft ³)	706.3	1059
Liq vol percent(%)	50	49.87
Fixed vessel P spec(psia)	25.01	16.94

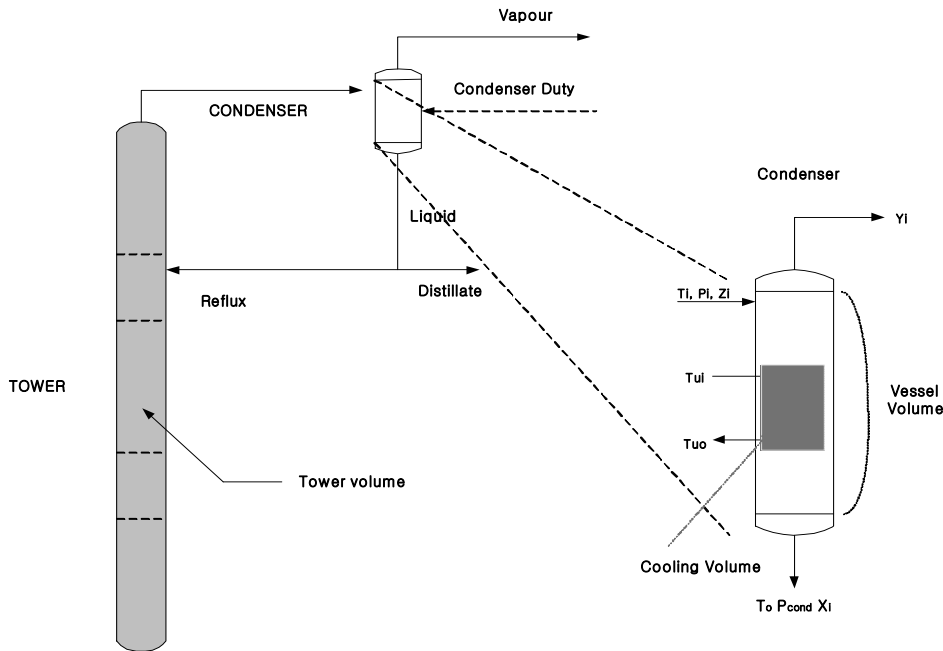


Fig. 1. Diagram to set up the condenser

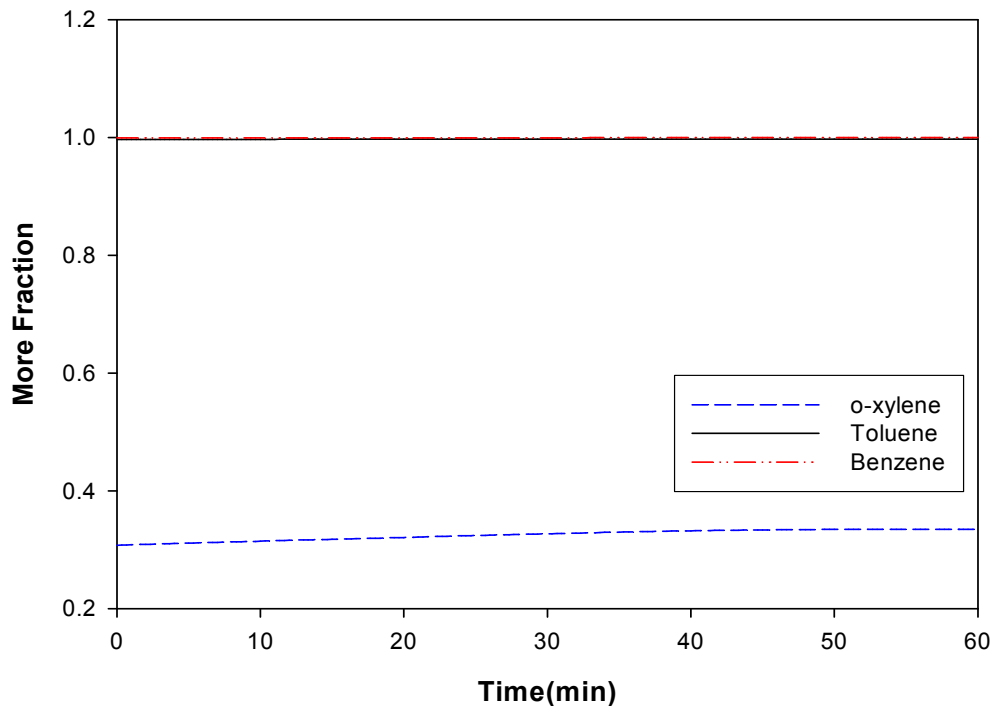
3. 가능한 제어구조의 동적모사

열복합 증류탑의 3X3의 기본제어구조는 상부 제품의 조절 변수는 top flow rate, reflux flow rate이고, 중간 제품의 조절변수는 side flow rate, liquid draw rate, vapor draw rate, vapor boilup rate이고, 하부 제품의 조절 변수는 vapor boilup, side flow rate이다.

기존의 제어구조에서의 open loop test를 통한 가능한 제어구조 중 FTCDC의 prefractionator의 액체흐름은 main column으로부터 오기 때문에 prefractionator flow rate의 조절 변수는 prefractionator와 main column사이의 액체 분할비를 직접 줌으로 side product의 조성 제어가 가능한데, 이 구조를 LL₂V라 한다.

$$y = \begin{bmatrix} x \text{ (Benzene)} \\ x \text{ (Toluene)} \\ x \text{ (o-xylene)} \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} L \\ L_2 \\ S \end{bmatrix}$$

비록 bottom product의 순도가 setpoint보다 낮지만 이는 side flow rate의 조절을 통해 이루어지기 때문에 제어에 초점이 되는 side product의 제어에 따른 순도를 고려해 보면 BTX 분리를 위한 FTCDC의 동적 모사의 제어구조 중 LL₂V 제어 구조가 가장 적합하다 사료 된다.

LL₂V Control StructureFig. 2. Dynamic simulation of LL₂V control structur**결론**

열복합 증류탑의 구조적 설계를 통한 탑의 단수, 원료 및 제품 배출단, 각 연결단 등의 구조적 정보를 기초로 공정 모사기를 통한 열복합 증류탑의 설계를 수행 하였다. 열복합 증류탑의 정상상태 공정을 Dynamic 공정으로 전환하여 동적 모사의 환경을 구축하였다. 열복합 증류탑의 가능한 제어 구조는 동적 모사를 통하여 발견 되어 질 수 있으며, Open Loop Test를 통하여 Side Draw Rate를 사용하여 toluene의 조성을 제어할 때 가장 큰 영향력을 주었고, 계단 변화 후 역응답을 보이는 문제점을 발견하여 가능한 제어구조에 대한 동적 모사를 수행하였다. 그 결과 가장 만족스러운 제어구조는 LL₂V 제어구조이고, benzene의 조성제어에는 reflux flow rate를 조절변수로 사용하고, toluene의 조성제어에는 liquid draw rate를 조절변수로 사용하고, xylene의 조성제어에는 vapor boilup rate를 조절변수로 사용하는 것이 가장 효율적인 제어구조임을 알 수 있었다.

Reference

- [1] Kister, H.Z.,: "Distillation Design", McGraw-hill, 1992
- [2] Kim, Y.H.,and Hwang, K.S., Korean. J. Chem. Eng., 383, 2002
- [3] Woof, E., A. and Skogestad, Ind. Eng Chem. Res., 34,2004-2103, 1995