

중간 열교환기를 이용한 열복합 증류탑의 운전성 향상

정수영, 김영한*
 동아대학교 화학공학과
 (yhkim@mail.donga.ac.kr*)

Improved Operability in a Fully Thermally Coupled Distillation Column with an Intermediate Heat Exchanger

Su Yeong Jeong, Young Han Kim*
 Dept. of Chemical Engineering, Dong-A University
 (yhkim@mail.donga.ac.kr*)

1. 서론

3성분 분리용 열복합 증류탑 (fully thermally coupled distillation column, FDCDC)이 기존의 2탑 증류 시스템보다 적은 에너지를 소비하기 때문에 유럽과 일본을 중심으로 차츰 활용이 늘어나고 있다. 그러나 현재 상용화된 열복합 증류탑은 분리벽탑 식으로 보통의 충전탑 중심부분을 길이 방향으로 양분하여 가운데 벽을 설치한 형태이다. 이러한 형태의 열복합 증류탑은 탑의 제작이 쉽고 증류탑의 운전이 간편한 반면에 충전탑이 아닌 트레이탑에는 활용이 되지 않으며 제품의 조성을 조절하기 위한 탑 운전의 변수가 적어 증류탑 운전의 폭이 좁은 단점을 갖고 있다. 충전탑은 대용량 처리가 불가능하고 증류공정에서 처리량 조절의 폭이 좁아 대단위 화학공정에 활용이 되지 못하고 있다. 열복합 증류탑의 에너지 절감효과가 기존공정에 비해 약 30%에 이르지만 이러한 문제 때문에 실제 공정에서 쉽게 채택하려고 하지 않는다.

증류탑의 활용을 위해서는 크게 두 가지 문제가 해결되어야 하는데 최적설계 방법의 개발과 최적인전의 방법을 확립하는 것이다. 통상의 증류탑 설계는 적정 환류량을 우선 결정하고 탑의 단수, 원료 공급단과 제품 생산단의 위치 계산을 하는 순서에 의해 설계가 이루어지나 열복합 증류탑의 경우는 전처리탑과 주탑의 연결위치에 따라 각각의 탑으로 공급되거나 유출되는 혼합물의 조성이 결정되고 이에 따라 액과 증기의 최적유량을 계산할 수 있다.

즉, 환류량을 기초로 하는 기존의 증류탑 설계방법이 적용되지 못하고 전처리탑과 주탑의 연결위치를 우선 계산하여야 하기 때문에 증류 시스템의 구조계산을 우선해서 실시하여야 한다. 구조계산에서는 전처리탑과 주탑 각각의 단수, 원료공급단과 중간제품 생산단 및 주탑에서 전처리탑과 연결되는 위치 등이 계산되어 진다.

또, 기존의 2탑 증류시스템과 비교하여 열복합 증류탑이 가진 다른 문제는 탑의 압력조절이 어렵다는 점이다. 2탑 시스템의 압력은 각각의 압력을 따로 설정할 수 있는 반면에, 열복합 증류탑은 전처리탑과 주탑 사이의 양방향 흐름연결 때문에 독립적인 압력의 설정이 곤란하다. 이 문제는 분리벽탑형 열복합 증류탑의 경우에 더욱 문제가 된다.

본 연구에서는 원래의 열복합 증류탑의 주탑을 중간제품 생산단에서 분할하여 2개의 탑으로 나누고 전처리탑과 상부 및 하부 주탑의 압력을 적절히 배열하여 증기흐름을 원활하게 한 구조를 제안하고자 한다. 특히, 하부 주탑에서 상부 주탑으로 공급되는 증기에 중간 열교환기를 부착하여 열복합 증류탑에서 생산되는 3 가지 제품의 조성 조절이 쉽도록 하였다. 이러한 열복합 증류탑의 설계방법을 설명하고, 핵산 제조공정에서 상업용 설계 프로그램인 HYSYS를 이용하여 제안된 열복합 증류탑이 원래의 열복합 증류탑에 비해 어느 정도의 운전성 향상을 이루었는지를 조사해보고자 한다.

2. 증류탑의 설계

제안된 열복합 증류시스템은 원래의 열복합 증류탑을 변형하여 구성하였기 때문에 증류탑의 설계는 구조적 설계절차를 사용한 원래의 열복합 증류탑의 설계를 우선 설명하고자 한다. 열복합 증류탑의 높은 증류효율은 증류탑 내의 액조성 분포가 잔류농도 곡선과 유사하기 때문이므로 잔류농도 곡선과 유사한 증류탑 구조를 가진 최소단 증류탑 설계를 기초로 한다[1,2]. 잔류농도 곡선은 전환류 조작의 충전탑에서의 탑 내 액조성과 유사하며 이때의 증류탑은 이상적인 완전한 증류효율을 가지며 최소의 증류단 만을 필요로 한다. 이러한 특성을 이용하면 잔류농도 곡선으로부터 최소단 증류탑의 구조 설계가 가능하다.

원료 공급단의 액조성이 원료의 조성과 같다고 가정하면 최소단 증류탑 시스템에서 전처리탑의 조성분포는 원료의 조성을 지나는 잔류농도 곡선이 되고 주탑의 조성분포는 중간제품의 조성을 지나는 잔류농도 곡선이 된다. 또, 전처리탑과 연결되는 주탑의 상부와 하부의 연결단은 이들 두 잔류농도 곡선이 가장 근접하는 위치를 선택하여 결정할 수 있다. 연결단에서는 증기와 액이 서로 교차하여 흐른다. 잔류농도 곡선으로부터 트레이탑의 단수를 계산하는 방법은 아래에서 구체적으로 설명하겠다.

이렇게 얻어진 증류탑은 이상적인 최소단 증류탑 구조이기 때문에 실제탑의 단수는 최소단을 확장하여 얻을 수 있는데 통상의 설계기준에 의하면 최소단의 2배를 실제단으로 계산하며 본 연구에서도 이 기준을 활용하여 앞에서 계산된 최소단에서 실제단의 단수를 계산하였다. 실제단 탑에서도 최소단 증류탑의 구조를 그대로 확대하였기 때문에 높은 증류탑 효율은 유지된다. 이렇게 구조적 설계가 결정되면 정해진 규격의 제품을 생산하기 위하여 증기와 액의 유속과 같은 운전변수를 계산하여야 하는데 여기서는 HYSYS를 이용한 시뮬레이션에 의해 계산을 하였다.

지금까지 설명한 설계는 열복합 증류탑의 설계방법이고 여기서 제안하는 분리된 주탑의 열복합 증류탑은 그림 1에 나타나 있다. 분리된 주탑의 증류시스템은 중간제품의 생산단을 경계로 상부와 하부의 주탑으로 분리되며 이들 사이에 증기와 액의 이동이 양방향으로 이루어진다. 이러한 구조개선에 따라 상부 주탑의 탑저에서 중간제품을 생산하므로 중간제품의 조성제어가 기존의 열복합 증류탑보다 쉽다. 또, 하부 주탑에서 상부주탑으로 공급되는 증기라인에 열교환기를 설치하여 증류탑 제어를 보다 쉽게 한 것이 본 제안의 증류시스템의 특징이다. 제안된 증류탑 구조가 단순히 원래의 열복합 증류탑을 분할한 것이므로 증류탑의 구조설계는 간단히 이루어진다. 제안된 열복합 증류탑의 설계결과와 원래의 열복합 증류탑의 설계결과가 표1에 나타나 있다. 상부 주탑은 기존의 열복합 증류탑에서의 중간제품 생산단 위의 구역으로부터 설계되어진 것을 알 수 있으며, 하부 주탑은 나머지인 것으로 설명된다. 주어진 제품의 규격에 맞는 생성물을 얻기 위해서 위에서 얻어진 증류탑의 구조를 바탕으로 제안된 증류 시스템의 운전조건을 계산할 필요가 있다. 이를 위하여 운전변수를 변화하면서 주어진 규격의 생성물 조성이 얻어질 때까지 시뮬레이션을 실시하였다. 운전변수의 시뮬레이션 결과는 표 1에 요약되어 있다. 여기서는 상업용 설계 프로그램인 HYSYS를 사용하였기 때문에 구조를 알고 있는 증류시스템에 대해서는

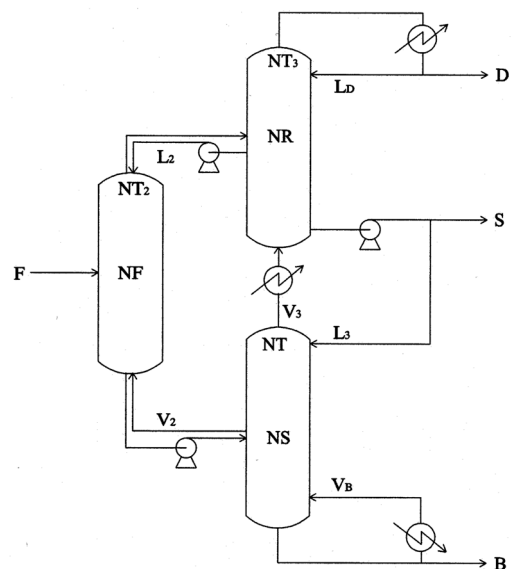


Fig. 1. A schematic diagram of the proposed fully thermally coupled distillation column.

상대적으로 단순하게 운전변수를 계산할 수 있었다. HYSYS 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 증류탑의 압력이 필요한데 이때 증기의 이동을 간편하게 할 수 있도록 증류탑의 압력설정을 하였다. 즉, 하부 주탑의 압력을 가장 높게, 그 다음으로 전처리탑의 압력, 상부 주탑의 압력은 증기흐름을 원활하게 하기위해 가장 낮게 설정 하였다. 이렇게 하면 증기 이송을 위한 압축기를 사용할 필요가 없어 압축기 설치의 비용과 압축기의 유지와 관리를 위한 비용을 절감할 수 있는 이점이 있다. 그러나 증기 흐름의 역방향인 액 흐름은 압력이 높은 곳으로 이동해야 하므로 펌프를 필요로 하나 압축기를 사용하는 데 비해 펌프를 사용하는 것은 전혀 문제가 없다. 그림 1은 액 흐름을 위한 3 개의 펌프가 필요함을 보여준다.

Table 1. Tray numbers from structural design and operating conditions for the proposed and original fully thermally coupled distillation columns of hexane process. Tray numbers are counted from top.

Name	Proposed			Original	
	Prefract	Upper	Lower	Prefract	Main
Structural					
number of trays	29	46	20	29	66
feed/side product	11	17	11	11	32
interlinking stages					11
					57
Operating					
feed (kmol/h)	98.75			98.75	
overhead (kmol/h)		57.52			57.52
bottom (kmol/h)		23.32	17.91		17.91
side (kmol/h)					23.32
reflux (kmol/h)	23.00	146.6	77.86	25.00	135.8
vapor boilup (kmol/h)	92.00	92.9	174.0	94.00	172.4
top pressure (kPa)	85.5	67.0	101.0	76.2	82.0
heat duty (GJ/h)			5.6		5.5

3. 결과 및 고찰

앞에서 설명한 설계방법에 따라 본 연구에서 제안된 열복합 증류탑을 설계하면 정상상태에서의 증류탑 설계결과가 얻어지고 이들을 정리한 것이 표 1이다. 원래의 복합 증류탑의 구조와 운전 자료를 함께 정리하여 서로 비교를 할 수 있게 하였다. 이들 두 시스템의 구조를 살펴보면 제안된 증류 시스템의 상부 주탑과 하부 주탑을 합치면 원래 시스템의 주탑 구조와 동일함을 알 수 있고 이는 앞에서 설명한대로 제안된 시스템이 원래의 열복합 증류탑에서 변형된 것임을 보여준다. 또, 원료와 제품의 유량은 양쪽이 동일하나 환류와 증기의 유량은 약간의 차이를 보여준다. 특히 제안된 시스템의 재비기 열공급량이 2% 증가된 것은 원래의 시스템은 전처리탑과 주탑의 압력 차이가 크지 않음에 반해 제안된 시스템의 경우 증기의 원활한 수송을 위하여 표 1에서와 같이 하부 주탑의 압력을 원래보다 높였기 때문에 필요한 열공급량이 증가되었다. 정상상태 설계의 결과를 이용하여 동적 시뮬레이션을 위한 HYSYS 공정도를 만든 것이 그림 2이다.

그림 2의 일반적인 구조는 그림 1과 동일하나 제어를 위하여 7개의 제어루프를 설치한 것이 차이를 보인다. 전체 시스템의 유량을 안정시키

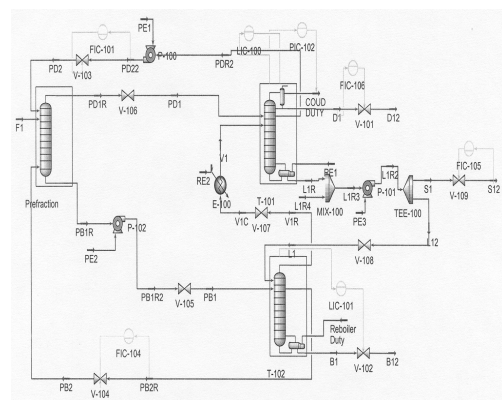


Fig. 2. A HYSYS flow diagram of dynamic simulation of the proposed fully thermally coupled distillation column.

기 위해서는 탑 내의 압력을 일정하게 유지시킬 필요가 있어 상부 주탑의 최상단 압력을 조절하는 제어루프를 설치하였다.

그림 3은 제안된 열복합 증류탑의 계단응답을 그림으로 나타낸 것이다. 맨 위 3 개의 그림은 환류량이 1.6% 감소함에 따른 상부제품, 중간제품 및 하부제품의 주요성분 조성 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 상부제품의 조성만 변화를 보이고 있어 환류유량을 조절하여 상부제품의 조성을 쉽게 제어할 수 있음을 알 수 있다. 이에 비하여 원래의 열복합 증류탑의 동일한 입력변화에 대한 응답은 상부제품과 하부제품의 조성이 동시에 변화함을 알 수 있다. 이러한 차이를 보이는 이유는 제안된 시스템의 경우 상부 주탑과 하부 주탑이 분리되어 있기 때문에 환류 유량의 변화와 함께 상부 주탑에서 하부 주탑으로 공급되는 액의 유량을 조절하여 환류유량의 변화가 하부 주탑에 영향을 주지 않도록 조정할 수 있기 때문이다. 원래의 열복합 증류탑은 주탑이 1 개로 이루어져 있기 때문에 이러한 조정이 불가능하다. 가운데 3 개의 그림들은 중간제품 유량이 1.5% 증가하였을 때의 3 가지 제품의 주요성분 조성의 변화를 보인 것이다. 제안의 증류 시스템과 원래의 열복합 증류탑 모두 중간제품과 하부제품의 조성 변화를 보이며 비슷한 특성을 나타내었다. 재비기의 열공급량을 0.5% 감소하였을 때의 제품의 조성변화를 살펴보면 제안된 시스템의 경우 하부제품의 조성만 변화를 가져온데 비해 원래의 열복합 증류탑은 3 가지 제품 모두 조성변화가 동시에 일어남을 알 수 있다.

1 개의 입력 변화에 따라 3 개의 제품 조성이 동시에 변화하면 생산제품의 품질 관리가 매우 어려워진다. 제안된 증류 시스템의 경우 1개의 제품 조성만 관리할 수 있는 이유는 하부 주탑에서 상부 주탑으로 공급되는 증기의 라인에 열교환기를 설치하여 하부 주탑에 가해진 열공급량의 변화가 상부 주탑으로 전달되지 않게 할 수 있기 때문이다. 즉 하부 주탑의 열공급량 변화에 따라 중간 열교환기에서 적절하게 열공급량을 조정함으로써 3 가지 제품의 조성변화가 동시에 발생하지 않도록 조절할 수 있기 때문이다. 위에서 언급한대로 원래의 열복합 증류탑에서는 이러한 조절을 위한 중간 열교환기의 설치가 불가능하여 운전성 향상의 효과를 얻을 수 없다. 본 연구에서 제안된 열복합 증류탑의 계단응답을 고려할 때 3 가지 제품 조성을 3 개의 입력, 즉, 환류 유량, 중간제품 생산량 및 재비기의 열공급량으로 제어하는 3 x 3의 제어 구조를 적용할 수 있으며 다변수 입출력 사이의 상호결합 (커플링)을 충분히 분리하여 공정을 제어할 수 있음을 보여주고 있다.

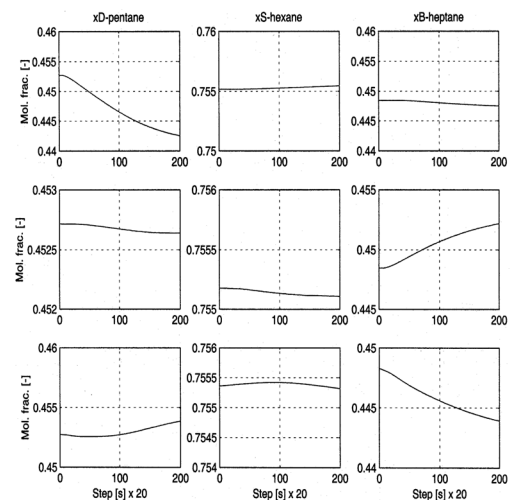


Figure 3. The responses of overhead, side draw and bottom product specifications with step changes of reflux and side draw rates and reboiler heat duty in the proposed fully thermally coupled distillation column.

감사

본 연구는 한국학술진흥재단의 연구지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

1. Y. H. Kim, "Structural design of fully thermally coupled distillation columns using a semi-rigorous model, *Comp. Chem. Eng.*, 29, 1555-1559, 2005.
2. Y. H. Kim, "A new fully thermally coupled distillation column with postfractionator," *Chem. Eng. Process*, 45, 254-263, 2006.