3기 증류탑 시스템의 헥산공정에의 응용

정옥진, 김영한*, 황규석[1]
동아대학교 화학공학과,
[1]부산대학교 화학공학과
(yhkim@mail.donga.ac.kr*)

Application of Three Column System to Hexane Process

Ok Jin Joung, Young Han Kim* and Kyu Suk Hwang[1]
Dept. of Chem. Eng., Dong-A Univ.,
[1]Dept. of Chem. Eng., Pusan National Univ.
(yhkim@mail.donga.ac.kr*)

서론

대부분의 경우에 3성분 혼합물을 분리하는 열복합 증류탑(fully thermally coupled distillation column, FTCDC)은 기존의 2탑 증류 시스템보다 적은 에너지를 소비하지만 탑의 운전이 기존의 시스템보다 어렵기 때문에 폭넓은 활용이 아직 이루어지지 않고 있다.

다성분 분리의 증류탑을 전환류 상태로 운전하면 탑의 증류곡선은 평형증류의 잔류농도 곡선에 근접하게 되며, 전환류 조작에서는 최소 에너지를 사용하기 때문에 탑의 열역학적 효율은 이상적이다. 통상적으로 2기의 증류탑이 3성분 혼합물의 분리에 이용되었지만, 액체의 조성분포가 평형증류의 잔류농도 곡선과는 완전히 다르다. 즉, 2탑 증류 시스템은 원료 공급단에서의 혼합과 중간비점 성분의 재혼합 같은 비가역적 과정이 포함되어 있기 때문에 비이상적이다. 그러나 2탑 시스템에 전처리탑을 부가하면 높은 증류탑 효율을 나타내는 열복합 증류탑과 유사한 조성분포를 가진다. 비록 부가된 탑이 3탑 시스템의 운전에서 제어루프의 수를 늘리지만, 세 가지 제품의 조성제어가 제어루프들 사이의 연결이 완전히 분리되기 때문에 열복합 증류탑의 조성제어보다 쉽다.

본 연구에서는 3성분 혼합물의 분리를 위하여 개량된 증류시스템을 제안하고 이를 실제 현장에서 사용하는 헥산 제조공정에 활용하여 그 성능을 조사하며 응용에서 생기는 문제점에 관해 분석해 보고자 한다.

구조 설계

본 연구의 3탑 증류시스템의 구조가 기존의 열복합 증류탑을 기본으로 구성되었기 때문에 열복합 증류탑을 먼저 설계하고 이를 바탕으로 3탑 증류시스템을 설계한다. 열복합 증류탑은 Fig. 1에 나타나 있는 것처럼 전처리 탑과 주탑으로 구성되어 있다. 두 탑의 액체 조성이 다성분계 평형증류의 잔류농도 곡선과 유사한 형태를 가질 때, 증류탑의 열역학적인 효율이 이상적임을 바탕으로 한 설계방법을 사용하면 열복합 증류탑을 설계할 수 있으나 여기서는 물질수지식을 이용한 계단식 설계법을 사용하여 다음과 같이 구조설

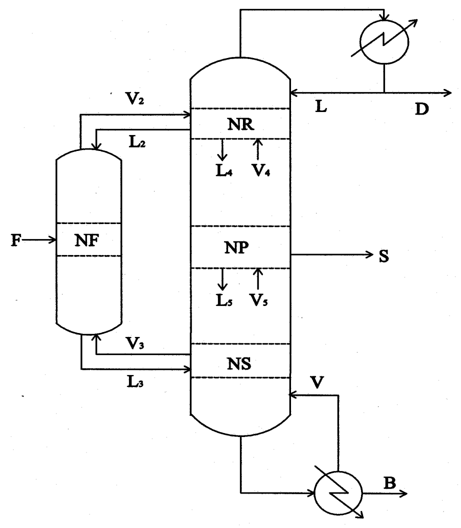

Fig. 1. A schematic diagram of a FTCDC.

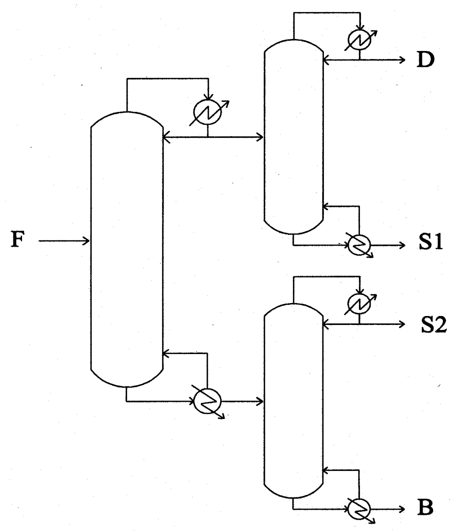

Fig. 2. A schematic diagram of a 3-column distillation system.

계를 하였다.

여기서는 설계의 편의를 위하여 원료 공급단의 조성과 원료의 조성이 같다고 가정하면, 원료 공급 시 혼합이 일어나지 않으므로 높은 탑효율이 얻어진다. 그러므로 원료 조성에 근접한 공급단의 조성을 만들기 위해 공급단의 조성이 원료의 조성과 같다고 가정하고 원료 공급단보다 한 단 위의 액체 조성은 물질수지로부터 계산할 수 있다. 이러한 계산방법으로 전처리 탑의 맨 위 단까지 단의 액체조성을 계산한다.

이상과 같이 물질수지를 사용하여 계단식으로 각 단에서의 액체 농도를 계산하고 계산된 단의 수로부터 전처리 탑과 주탑의 단수, 원료 공급단(NF)의 위치, 중간비점 제품 생산단(NP) 및 상부(NR)와 하부연결단(NS)을 알아낼 수 있다. 실제탑의 경우 공급단의 액체 농도가 원료의 농도와 다르므로 설계 시 계산의 편의를 위하여 같다고 가정하고 계산하였기 때문에 보정이 필요하다. 본 연구에서는 얻어진 주탑의 단수에 통상설계기준을 적용하여 1.7을 곱한 값을 사용하였다. 이렇게 얻은 결과는 열복합 증류탑의 구조이며 이를 바탕으로 3탑 시스템의 구조를 얻을 수 있다. 양쪽 시스템의 전처리 탑은 같기 때문에 같은 값을 사용할 수 있다. 3탑 시스템의 상부탑은 열복합 증류탑의 주탑에서 중간비점 제품의 생산단의 상부 부분에 해당되며, 하부탑은 주탑의 하부 부분에 해당된다. 그러나 HYSYS 시뮬레이션 과정에서 약간의 단수 조정이 있었으며 전체 단수는 동일하다. Table 1에 열복합 증류탑의 설계결과와 3탑 증류시스템의 설계결과가 정리되어 있다.

이렇게 3탑 증류 시스템의 구조자료가 얻어지면, 주어진 제품의 조성을 생산할 수 있는 증류탑의 운전조건 즉 액과 증기의 유량 같은 조작 변수들은 HYSYS 시뮬레이션을 통해 구할 수 있다. HYSYS 시뮬레이션에서 증류 시스템의 구조를 입력하고 운전변수를 변화시키면서 Table 1에 주어진 3가지 제품의 양과 조성이 얻어질 때까지 반복 계산한다.

결과 및 고찰

열복합 증류탑이 기존의 2탑 시스템에 비하여 적은 에너지를 사용하는 높은 열역학적 효율을 가지지만, 운전의 어려움은 열복합 증류탑의 실제적인 활용을 제한하여 왔다. 이러한 운전성 개선을 위하여 3탑 증류시스템을 제안하고 이 시스템의 성능을 에너지 소요량을 비교하여 평가하고자 한다. 이런 평가는 기존의 2탑 시스템과 열복합 증류탑과 비교하여 실시하고 또 3탑증류시스템의 실제 활용 시 생겨나는 문제점을 검토하고자 한다.

Table 1. Tray numbers from structural design and operating conditions for 3-column, the FTCDC and 2-column systems of hexane process. Tray numbers are counted from top.

Name	3-coumn			FTCDC		2-column	
	Prefract.	Upper	Lower	Prefract.	Main	1st	2nd
Structural							
number of trays	29	46	20	29	66	25	70
feed/side product	10	17	11	11	32	11	44
interlinking stages					11		
					57		
Operating							
feed(kmol/h)	98.75	71.00	27.75	98.75		98.75	41.22
overhead(kmol/h)	71.00	57.52	9.840		57.52	57.53	23.32
bottom(kmol/h)	27.75	13.48	17.91		17.91	41.22	17.90
side(kmol/h)					23.32		
reflux(kmol/h)	34.00	73.00	61.00	25.00	134.1	132.3	74.39
vapor boilup(kmol/h)	99.74	123.5	65.93	94.00	169.3	175.7	89.92
heat duty(GJ/h)	3.121	3.636	2.108		5.449	5.382	2.892

헥산 공정에 대해, 3탑 시스템의 구조적인 설계는 Table 1에 나타나 있는 것처럼 열복합 증류탑의 설계 결과로부터 유도되었다. 3탑 시스템의 상부탑은 열복합 증류탑에서 주탑의 상부 부분(중간비점 제품생산단 기준)과 유사하고, 그와 유사하게 하부탑은 열복합 증류탑 주탑의 하부 부분과 유사하다. 두 시스템에서 전처리 탑은 동일하다. 이들 3가지 조성들은 3탑 시스템과는 달리 직선을 이루지 않아 열복합 증류탑의 구조 설계를 유연하게 한다. 열복합 증류탑의 경우는 전처리 탑과 주탑 사이에 양방향 물질이동이 일어나기 때문에 이들 조성 사이에 직선을 이룰 필요가 없다.

헥산 공정의 운전에 관한 HYSYS 시뮬레이션의 결과가 Table 1에 나타나 있다. 비록 3가지 다른 시스템이 주어진 조성의 같은 제품을 생산한다 할지라도, 에너지 소모량이 각각 다르다. 열복합 증류탑의 경우는 기존의 2탑 시스템에 비해 34%의 에너지 절감효과가 있으나 3탑 시스템은 2탑 시스템에 비해 오히려 7% 더 많은 에너지를 요구한다. 이는 앞에서 지적한 전처리 탑의 원료와 제품의 조성 사이에 직선성의 조건에 따른 증류탑 설계의 제약에 의해 생긴 문제점이다. 그러나 3탑 시스템의 하부 탑 운전압력을 0.1기압 상승시키면 하부탑의 냉각기에서 회수된 열을 상부탑의 재비기에서 활용할 수 있는 구조가 가능하다. 이러한 변형 시스템의 공정을 HYSYS 공정도로 작성한 것이 Fig. 3이다.

그림에서와 같이 하부탑의 냉각기와 상부탑의 재비기를 1개의 열교환기로 구성하고 부족한 열량은 추가의 가열기를 설치하여 해결하였다. 이러한 구조는 2탑 시스템에 비해 다소 복잡한 구조이지만 3가지 제품의 조성을 각각 조절하기가 쉽고 2탑 시스템에 비해 18%의 에너지 절감효과를 얻을 수 있다. 2탑 시스템의 경우는 제 1탑의 재비기 온도가 제 2탑의 냉각기 온도보다 너무 높기 때문에 단순한 열결합이 불가능하다.

열복합 증류탑의 높은 효율과 낮은 에너지 소요는 현장 기술자들에게 널리 알려져 있으나, 조작상의 어려움이 탑의 실제적인 활용에 많은 제약을 가져왔다. 물론 기존의 2탑 시스템보다 3탑 시스템에 탑이 하나 더 많기 때문에 보다 많은 제어루프를 요구하지만, 3가지 제품의 조성 제어는 열복합 증류탑의 조성 제어보다 훨씬 용이하다.

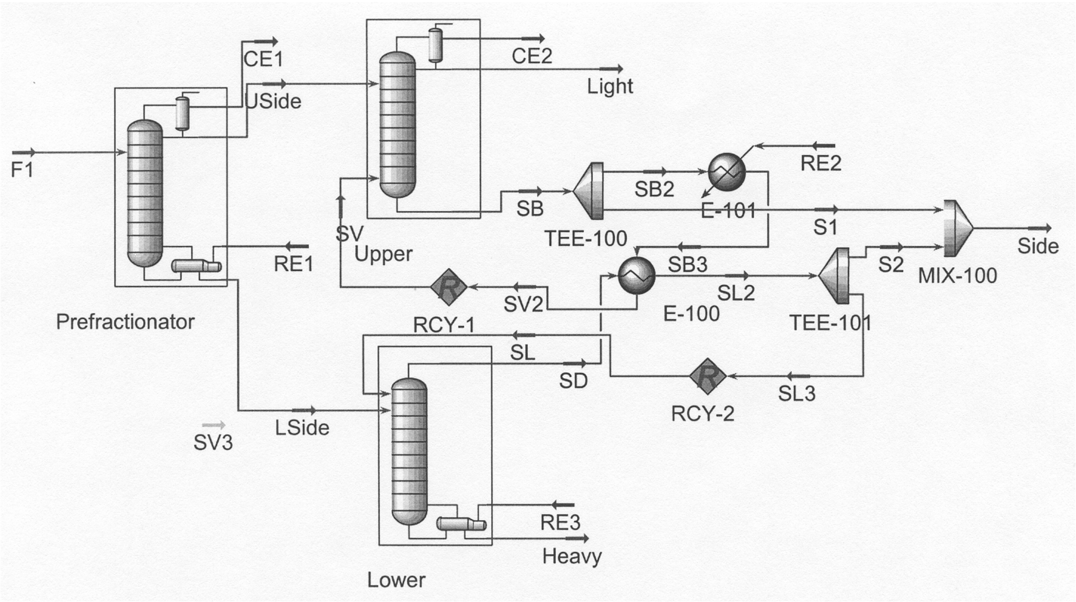

Fig. 3. A HYSYS flow diagram of 3-column distillation system with heat integration.

또한 3탑 시스템에서 3기의 탑의 운전 압력은 각각 따로 조절이 가능하기 때문에 다중 열결합에 의한 에너지의 회수가 가능하지만, 열복합 증류탑에서는 전처리 탑과 주탑 사이의 양방향 흐름 연결 때문에 탑의 압력을 임의대로 조절하기 어렵기 때문에 시스템 내에서 에너지를 회수하여 재사용하기가 불가능하다. 3탑 시스템은 3기의 탑을 각각 다른 압력으로 운전하기 때문에 탑의 단수의 차이에 따른 탑 설치의 구조에 제한이 없으나 열복합 증류탑의 경우는 전처리탑의 수직적 위치의 선정을 적절하게 하지 않으면 주탑과의 양방향 기액 이송을 할 수 없는 문제가 있다.

결론

에너지 절약형 증류 시스템인 열복합 증류탑의 낮은 운전성을 개선하기 위하여 3기의 2성분 증류탑을 사용하여 3가지 제품을 생산하는 공정을 제안하고 실제 현장에서 사용하는 헥산 제조공정에 활용하였을 때의 성능을 조사하였다. 원료와 제품의 조성사이에 직선성을 필요로 하기 때문에 3탑 증류시스템의 설계에 제한이 있어 열복합 증류탑과 같은 탑효율은 얻어지지 않으나 시스템 내에서 에너지 회수가 가능하여 이를 활용할 경우 기존의 2탑 시스템에 비해 18%의 에너지 절감효과를 얻을 수 있다. 3탑 시스템은 3기의 증류탑을 각각 운전하기 때문에 3가지 제품의 조성조절이 쉽고 각각의 운전압력 설정이 쉬운 장점을 가지고 있다.

감사

본 연구는 한국학술진흥재단 (과제번호 2004-002-D00093) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.