

동적모사에 기초를 둔 열복합증류탑의 운전과 제어

오대석*, 이주영, 안대명, 김영한¹, 황규석
 부산대학교 화학공학과, 동아대학교 화학공학과¹
 (invin75@hanmail.net*)

Operation and Control of a Fully Thermally Coupled Distillation Column Based on Dynamic Simulations

Dae Suk Ohk*, Ju Yeong Lee, Dae Myung An, Young Han Kim¹, Kyu Suk Hwang
 Pusan National Univ., Dong-A Univ¹
 (invin75@hanmail.net*)

서론

석유화학공정에서의 이성분 이상의 분리는 연속 배열된 증류탑들에 의해 분리하는 방법을 사용하고 있다. 잘 알려진 바와 같이 증류는 에너지 다소비 공정이고, 열교환기등의 부대기기와 제어계를 포함하면 설비비가 비싸며, 또한 설치장소도 많이 필요로 한다.

에너지 절약으로 설비비 및 설치장소를 삭감할 수 있는 가능성이 있는 Petlyuk Column 은 반세기 전부터 연구되어 왔으며, 현재 Petlyuk Column 방식을 가지는 열복합증류탑의 유용성이 확인되고 있다. 그러나 열복합증류탑의 구조는 에너지 절약 효과를 위해 순환 흐름을 가지는 복잡한 구조의 공정을 이루고 있고, 이러한 이유로 열복합증류탑은 설계와 운전 및 제어의 어려움을 가지며 극히 제한적으로 활용되고 있다.

본 연구에서는 동적모사에 기초하여 BTX 분리공정을 대상으로 열복합증류탑의 동적 거동을 연구할 것이고 적당한 제어기 구조들을 제안할 것이며, 3가지 product stream의 조성 제어에 목표를 둔다.

열복합증류탑 설계

동적모사에 적용될 각 제어 및 조작 변수들의 초기 정보를 얻기 위해서는 열복합증류탑의 설계가 이루어져야한다. 증류탑 내의 액의 조성분포가 평형증류 조성곡선과 유사하도록 함으로써 탑내에서 stream의 혼합이 최소가 되어 탑효율을 극대화 할 수 있는 구조적 설계법을 이용하여 증류탑을 설계한다.

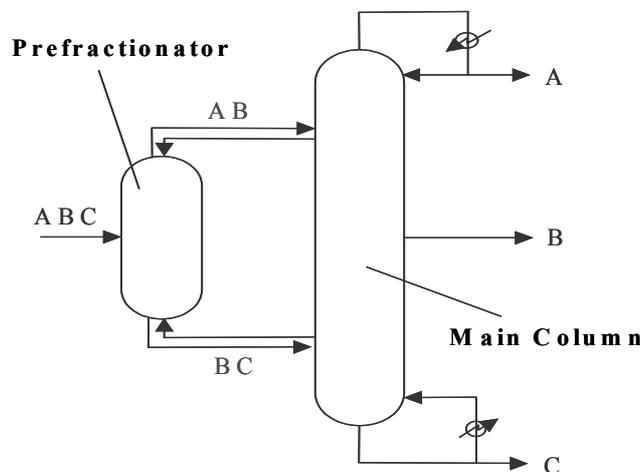


Fig. 1. Schematic diagram of a fully thermally coupled distillation column.

그림 1에서와 같이 왼쪽에 있는 전처리탑에 원료가 공급되면 대부분의 저비점 혼합물과 반 정도의 중간비점 혼합물이 전처리탑의 상부로부터 주탑으로 이동되고 나머지의 중간비점 혼합물과 고비점 혼합물은 전처리 탑의 하부로부터 주탑으로 공급된다. 이때 전처리탑과 주탑의 연결단 사이는 증기와 액체가 서로 교환되기 때문에 전처리탑에서는 재비기와 냉각기를 필요로 하지 않으며 이러한 이유로 열복합증류탑을 이용하면 에너지 사용을 절감할 수 있다. 주탑에서는 저비점 혼합물, 중간비점 혼합물 및 고비점 혼합물이 생산제품의 규격에 맞는 고농도로 각각 분리되어 증류된다. 열복합형 증류탑은 전처리탑과 주탑으로 구성되며 탑의 단수, 두 탑의 연결위치, 원료 공급단, 중간제품 배출단의 결정을 위한 설계는 다음과 같이 한다.

첫째 전환류 조작에 의해 증류를 한다고 가정하면 최소의 증류단수를 계산할 수 있고 최소 증류단의 단수를 2배로 하여 실제 소요의 증류단수를 계산할 수 있다. 최소 소요단을 계산하기 위해서는 전처리탑의 경우 액체 원료의 조성을 원료 투입단 조성으로 하고 그 보다 1단 위쪽은 원료의 조성보다 평형을 이루는 증기의 조성을 그 단의 액체 조성으로 한다. 전환류 조작에서는 탑의 효율이 이상적이고 탑내 조성분포가 평형관계만으로 계산되기 때문이다. 이렇게 하여 전처리 탑의 상부탑 조성을 각각 계산한다. 전처리탑 하부의 조성분포는 반대로 원료 투입단에서부터 1단 아래의 단의 증기조성이 액체 원료의 조성보다 같은 것으로 하여 차례차례 1단씩 내려가면서 계산한다. 전처리탑의 상부와 하부의 조성분포를 계산하여 두고 각각의 끝은 주탑의 조성분포를 계산한 후에 결정한다.

그림 1의 오른쪽 탑은 주탑인데 주탑의 조성계산은 중간제품의 농도를 기준으로 상부와 하부탑의 조성을 전처리탑과 동일하게 계산하여 상부는 상부제품의 조성이 얻어질때까지 계산하고 하부는 하부제품의 조성이 얻어질 때까지 한단씩 계산해 내려간다. 이렇게 하여 상부 끝과 하부 끝의 단수를 합하면 주탑의 전체 단수가 얻어지고 중간제품의 배출단은 상부와 하부단의 수로부터 결정된다. 전처리탑의 단수와 주탑의 연결단은 두탑의 조성분포를 비교하여 계산하는데 두 탑의 조성분포를 나열하고 불순물의 양과 두탑의 조성어느 정도 근접하는지를 고려하여 결정한다. 이렇게 결정된 전처리탑의 상부조성의 단수와 하부조성의 단수를 합하면 전처리탑의 전체 단수가 되고 원료의 공급단은 상부와 하부의 단수를 비교하여 결정된다. 또 주탑의 연결부위는 전처리탑의 양쪽 끝 조성 각각과 이에 대응하는 위치를 찾아서 알아낸다. 이렇게 하면 열복합증류탑의 설계를 위한 단수가 결정된다. 그림 2에 단수 결정을 위한 평형증류의 조성분포를 표시하였다. 그림에서 Ffh 표시된 것이 원료단의 조성이고 Dsms 상부제품의 조성, B는 하부제품의 조성, S는 중간제품의 조성을 나타낸다.

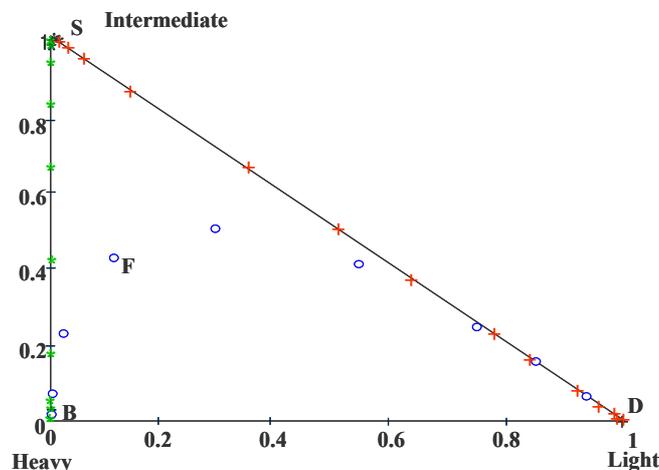


Fig. 2. Liquid composition profile in minimum trays.

우선 x와 +로 표시한 것이 전처리탑의 조성분포를 위에서 설명한 대로 한 단씩 계산한 것이다. 전처리탑의 상부쪽으로 2번째의 +가 불순물(고비점 성분)이 적고 주탑의 조성 중 근접하는 조성을 찾을 수 있어 이 단을 전처리 탑의 최상부 단으로 결정하고 하부단의 끝은 두 번째(저비점 성분이 거의 없음)로 결정한다. 아울러 주탑의 연결단은 근접하는 조성의 단으로 정한다. 이렇게 계산된 단수는 최소 소요단으로 실제로는 전환류 조작을 하지 않으므로 실제단수는 통상의 설계기준에 따라 최소단의 2배로 하여 실제 소요단을 결정한다. 최소단으로부터 계산된 단수는 운전조건의 계산에서 약간 수정되었으며 팔호 안에 있는 값이 수정된 단수이다. 운전조건을 계산하기 위하여 표 1과 같은 증류탑의 구조를 가진 열복합증류탑에 여러 가지 운전조건을 사용하였을때의 증류계산을 반복 실시하여 요구되는 제품을 생산하면서 에너지 사용이 가장 적은 조건을 찾아야 한다. 이러한 계산을 위해 본 연구에서는 상업용 계산 프로그램인 HYSYS를 사용하였다.

Table 1. Structural Design and Operating Condition

Name	Prefractionator	Main Column
Structural		
number of trays	21(18)	89(82)
feed/side product	7	28
interlinking stages		6
		74(58)
Operating		
feed (kg-mol/h)	801.8	
overhead (kg-mol/h)		86.8
bottom (kg-mol/h)		337.7
side (kg-mol/h)		377.3
reflux (kg-mol/h)	290.1	1792
vapor boilup (kg-mol/h)	492.9	1634
heat duty (Gcal/h)		14.18

동적모사

설계에서는 그 증류탑 운전을 정상상태에서 있는 것으로 가정하였다. 따라서, 단 액체 조성은 정상상태 수지로부터 직접적으로 얻어진다. 그러나, 동적모사에서 조성은 단에서의 액체 holdup의 비정상 상태 성분 물질수지로부터 계산된다. 운전의 초기 정보, 예를 들면 액체와 증기 흐름 속도들, 기체 조성과 온도는 정밀한 모사로부터 계산되고, 동적모사에 공급된다. 동적모사에 대한 정규모델에서, 이상적인 단 효율은 가정된다. 또한, 증기 holdup은 기체 holdup보다 훨씬 더 적으므로 무시된다. 초기의 액체 흐름 속도로부터, 단들의 액체 holdup은 Francis weir방정식을 사용하여 계산된다. 이때 정확한 단 holdup이 요구된다. 만약 그렇지 않으면, 잘못된 액체 흐름 속도가 holdup으로부터 생기게 된다. 그리고 반복된 계산은 해에 수렴하지 않는다.

액체 조성에서, 증기 조성과 단 온도는 UNIQUAC 평형 관계를 사용하는것에 의해서 계산된다. 그 밖에 액체와 증기의 엔탈피들이 단들에서 에너지 수지들을 나타내기위하여 사용되었다. 증기 흐름 속도는 n번째 단의 에너지 수지로부터 얻게된다.

$$M = (h_{n+1} L_{n+1} + H_{n-1} V_{n-1} - h_n L_n) / H_n$$

성분 물질 수지는

$$M_n \frac{dx_{n,i}}{dt} = L_{n+1} x_{n+1,i} + V_{n-1} y_{n-1,i} - L_n x_{n,i} - V_n y_{n,i}$$

이고, i 번째 성분의 단 holdup의 변화는 방정식으로부터 계산된다. 그 변화는 새로운 액체 조성을 만든다. 마찬가지로, 전체 단 holdup의 변화도 또한

$$\frac{dM_n}{dt} = L_{n+1} + V_{n-1} - L_n - V_n$$

으로써 얻어지게 된다. 그리고 새로운 액체 흐름 속도는 holdup과 Francis weir 방정식으로부터 주어진다. 액체 조성의 새로운 조성분포가 된 후에, 액체와 증기 흐름 속도가 얻어지며 초기조건으로써 동적모사에 제공된다.

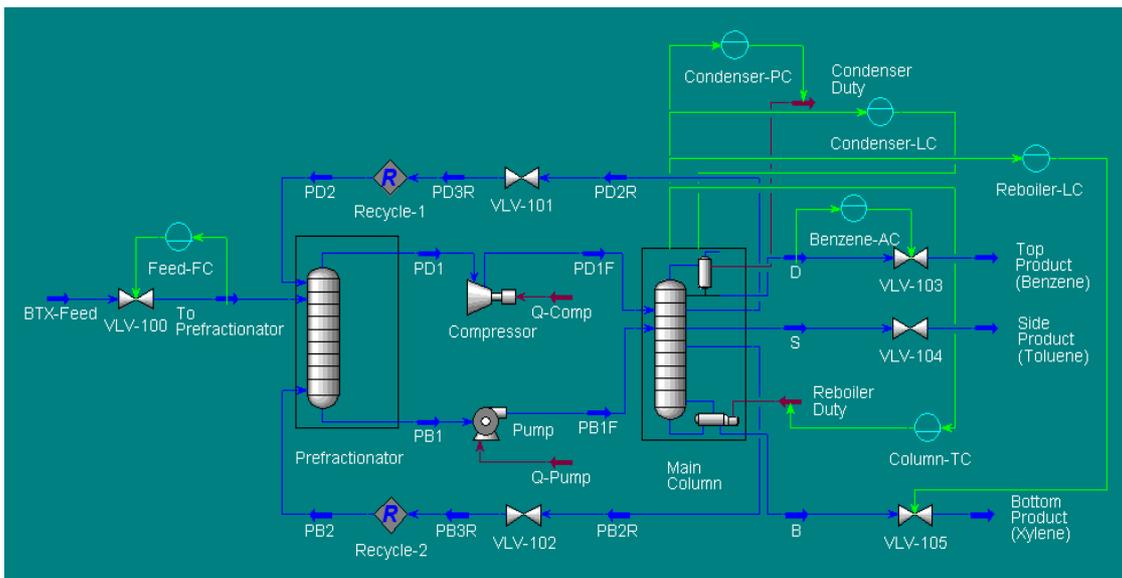


Fig. 3. PFD of a fully thermally coupled distillation column.

결론

구조적 설계방법에 의해 운전 변수들의 초기 정보를 얻었으며, 그 변수들은 동적모사에 적용되었다. 설계로부터 얻은 액체와 증기 흐름 속도, 온도, 액체 조성의 초기값을 사용하여 증류탑의 가능한 제어구조에 대한 3개 product 사양들의 몇몇 단계 응답들을 얻기 위해 동적모사가 수행되었다. 그 세 사양들은 overhead product에서 가장 가벼운 성분과 side product에서 중간생성 성분, bottom product에서 가장 가벼운 성분의 조성이다.

조작 변수로써 overhead product의 조성 제어에 환류 흐름 속도를 사용하고, bottom product의 조성 제어에 대한 가능한 조작 변수로 증기 흐름 속도들이 선택되었다. 그리고 side product의 조성 제어는 전처리탑 액체 흐름이 이용되었다. 동적모사의 결과로 각 조성의 제어는 다소 어려웠지만 열복합증류탑의 운전은 수행되었다.

참고문헌

1. Abdul Mutalib, M.I. and Smith, R., "Operation and Control of Dividing Wall Distillation Columns", *Trans. IChemE*, 76, Part A, 308 (1998).
2. Wolff, E.A. and Skogestad, S., "Operation of Integrated Three-Product (Petlyuk) Distillation Columns", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 34, 2094 (1995).
3. Triantafyllou, C. and Smith, R., "The Design and Optimisation of Fully Thermally Coupled Distillation Columns", *Trans. IChemE*, 70, Part A, 118 (1992).