

Aspen HYSYS를 이용한 나프타 분리공정의 Petlyuk Distillation Column 설계

이주영
울산과학기술대학교 환경화학공학과

Design of Naphtha Splitter Unit with Petlyuk Distillation Column Using Aspen HYSYS Simulation

Ju-Yeong Lee

Department of Environmental & Chemical Industry, Ulsan College

요 약 나프타분리공정은 원유에서 증류 공정에 의해 얻어지는 풀레인지납사(Full Range Naphtha)를 원료로 하여 끓는점 차이에 의해 각각 경질납사, 중질납사 및 등유 반제품으로 순차적으로 분리한다. 이러한 전통적인 분리 방법은 2성분을 분리하는 Column을 연속으로 설치하여 생산한다. 이러한 분리방법은 리보일러에서 소비되는 에너지가 증류탑 내부 고비점 성분을 분리시키는 데 사용되고 이 에너지의 대부분은 탑정의 냉각기에서 응축열로 버려지게 때문에 에너지 낭비가 큰 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 납사분리공정의 2개의 Column을 Petlyuk Column으로 설계하였다. 탑내 조성분포가 평형관계만으로 계산되는 이상적 단수 효율 하에서 stage to stage 계산방법으로 구조적 설계를 하였고 일반 증류탑과 비교한 결과 제시된 Petlyuk Distillation Column의 설계 방법이 기존의 3-column 모델보다 설계 시간이 단축될 뿐만 아니라 증류탑내의 액의 조성분포를 평형증류 조성곡선과 유사하도록 설계함으로써 에너지 효율 측면에서도 효율적임을 입증하였다. 또한 같은 tray 단수하에서 Petlyuk Column은 일반 증류탑 대비 약 12.3% 에너지가 절약될 뿐만 아니라 초기 투자비도 절약됨을 알 수 있었다.

Abstract FRN (Full range Naphtha) is distilled from crude oil in a Naphtha Splitter Unit and is separated into the Light Straight Naphtha, Heavy Naphtha, and kerosene according to the boiling point in sequence. This separation is conducted using a series of binary-like columns. In this separation method, the energy consumed in the reboiler is used to separate the heaviest components and most of this energy is discarded as vapor condensation in the overhead cooler. In this study, the first two columns of the separation process are replaced with the Petlyuk column. A structural design was exercised by a stage to stage computation with an ideal tray efficiency in the equilibrium condition. Compared to the performance of a conventional system of 3-column model, the design outcome indicates that the procedure is simple and efficient because the composition of the liquid component in the column tray was designed to be similar to the equilibrium distillation curve. An analysis of the performance of the new process indicated an energy saving of 12.3% under same total number of trays and with a saving of the initial investment cost.

Keywords : Petlyuk Column, Naphther Splitter Process, Aspen HYSYS, Energy saving, Process simulation

1. 서론

나프타분리공정에서 나오는 나프타유분을 분리하는

방법은 일반 증류탑과 유사하게 한 개의 탑에서 한가지 유분이 분리되는 방법을 사용하고 있다. 나프타분리공정은 원료로 풀레인지 납사(FRN, Full Range Naphtha)를

본 논문은 울산과학기술대학교 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Ju Yeong Lee(Ulsan College.)

Tel: +82-52-279-3174 email: jylee@uc.ac.kr

Received November 16, 2017

Accepted February 2, 2018

Revised (1st January 2, 2018, 2nd January 22, 2018)

Published February 28, 2018

사용하여 경질납사(LSR, Light Straight Run Naphtha), 중질납사(Heavy Naphtha) 및 등유 반제품(kerosene)로 분리되며, 이성분 증류탑과 유사하게 한 개의 탑에서 한 가지 성분씩 분리하는 방법을 사용하고 있다. 첫 번째 증류탑의 상부제품으로 경질납사(TBP 범위 : 42~64℃)를 분리하고 두 번째 증류탑의 상부와 하부에서는 각각 중질납사(TBP 범위 : 64~151℃), 등유(Kerosene, TBP 범위 : 151~180℃) 반제품으로 분리하는 2탑 방식이다. 이 방식은 현재의 석유화학 공정에서 일반적인 분리방법으로서 리보일러에서 소비되는 에너지가 증류탑 내부 고비점 성분을 분리시키는 데 사용되고 이 에너지의 대부분은 탑정의 냉각기에서 응축열로 버려지게 때문에 에너지 낭비가 큰 것으로 알려져 있다.[1,2]일반 증류탑 분리 방식에서 에너지 소비가 큰 근본적인 이유는 첫 번째 탑에서 중간비점의 성분의 재혼합(Re-Mixing)현상이 발생하여 성분 분리 효율에 영향을 미치는 것과 원료 조성과 탑내부의 원료단에서의 액체조성과의 차이 때문에 발생하는 것으로 알려져 있다[3,4]. 다성분 분리의 증류탑을 전환류 상태로 운전하면 탑내의 증류곡선은 평형증류의 잔류농도 곡선에 근접하여 탑내의 열역학적 효율은 이상적이 된다.[5]이러한 이상적인 증류곡선은 에너지 효율이 높은 증류시스템의 하나로 알려져 있는 Petlyuk column의 탑내 액체조성 분포와 유사하다. Petlyuk column 경우 탑 Tray에서의 액의 조성분포가 다성분 평형증류 곡선과 유사하여 증류탑 내부에서의 스트림의 혼합이 최소가 되어 분리 효율을 최대로 할 수 있는 반면 기존 증류탑에서는 많은 차이를 가지고 있어 Petlyuk column이 기존의 증류방식에 비하여 월등한 에너지 절감이 가능하다.[6,7]또한 증류탑의 리보일러와 냉각기로 사용되는 열교환기의 설비 용량도 작게 할 수 있어 열교환기 초기 제작 비용도 절감이 가능한 것으로 알려져 있다.(그림 1).

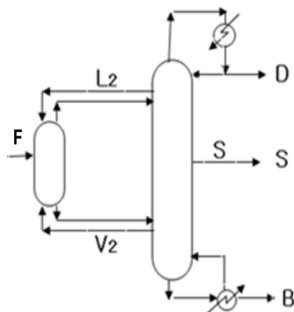


Fig. 1. Schematic diagram of a Petlyuk distillation column

Petlyuk column 설계에 관한 연구는 3-column모델을 이용한 Smith교수팀의 연구[8]가 처음이다. 증류탑내 액의 조성분포가 평형증류 조성곡선과 유사하면 탑내에서의 탑효율을 극대화 할 수 있으므로 국내의 Kim교수팀이 다성분 평형증류곡선을 이용한 구조적 설계방법을 제시하였고,[9]본 연구에서는 이 설계법을 이용하여 석유 공정에서 경질납사와 중질납사를 주 제품으로 생산하는 납사 분리 공정을 Petlyuk column으로 설계한다. 이를 위해 상용 석유화학공정모사기인 Aspen HYSYS Software를 이용하여 모사하고 Petlyuk column의 동력사용량 및 설비비를 기존 증류탑과 비교하여 에너지 절감효과를 검토한다.

2. Petlyuk Column 설계

납사분리공정에서 원료인 플레인지 납사(Full Range Naphtha)는 표준 끓는점 NBP[42℃]~NBP[180℃]범위에 있으며 20개 NBP 구간으로 분석하였다. 이 Feed유분을 Petlyuk column을 사용하여 NBP[42℃]~NBP[64℃] 구간 범위인 경질납사 제품, NBP[64℃]~NBP[151℃] 구간 범위인 중질납사 제품, NBP[151℃]~NBP[180℃] 구간 범위인 kerosene 반제품으로 각각 분리하고자 한다.

원료 유분의 NBP구간은 20개이지만 비점과 함량에 따라 경질납사제품인 저비점 혼합물, 중질납사제품인 중간비점 혼합물, 나머지 kerosene 반제품으로 사용되는 고비점 혼합물의 3가지로 분류한다. Petlyuk column은 그림1에서와 같이 전처리탑과 주탑을 vapor/liquid flow로 연결하여 통합 된 구조로 배열되는 데 이 전처리탑 상부로부터 저비점 유분과 중간 정도의 중간비점 유분이 Vapor형태로 주탑으로 이동되고, 나머지의 중간 비점 유분과 고비점 유분은 전처리탑의 하부에서 Liquid형태로 주탑으로 이동된다. 전처리탑의 리보일러 역할은 주탑 하부에서 뜨거운 Vapor 일부(V2)를 이송받아 해결하고 환류 역할은 주탑 상부에서 찬 Liquid(L2)를 일부 도입하여 처리한다. 이렇게 전처리탑과 주탑의 상호 역할이 이루어지면 주탑의 상부, 중간, 하부에서는 각각 저비점, 중간비점, 고비점 유분이 제품의 생산규격에 맞게 각각 분리된다. 이 경우 주탑에서 전처리탑으로 가는 액체유분(L2)는 Cooler역할을, 증기유분(V2)는 Reboiler역할을 하므로 전처리탑에서는 Reboiler와 Cooler를 필요

로 하지 않아 초기 설비비 절감이 가능하고 주탑내에서의 성분곡선은 각 단에서의 평형성분과 유사하도록 함으로써 유분 혼합이 최소가 되어 증류 효율이 기존의 증류탑 방식보다 높아 에너지 사용량 절감이 가능하다.

기존 증류탑 설계로는 최적 환류식을 사용하여 증류탑의 단수를 계산할 수 있지만 Petlyuk column 설계에서는 그 절차는 주탑과 전처리탑의 연결단 위치와 조성의 정확한 값을 알 수 없기 때문에 사용할 수 없다. 따라서 전처리탑과 주탑의 단수, 두 탑의 연결 단수, 전처리탑의 원료 공급단, 주탑의 중간비점 제품의 배출단 결정을 하기위해 기존 설계방법은 주탑과 전처리탑의 연결 stream의 조성을 수많은 반복 계산으로 구한다. 하지만 이 연구에서는 제품의 조성이 이상적인 단 효율을 가정한 평형증류곡선법을 사용, 단 한번의 계산으로 전환류 상태의 주탑 내부의 조성분포를 계산하여 Petlyuk column을 설계한다.[9]Petlyuk column의 구조적 설계를 위한 정보와 운전에 필요한 운전변수들을 선정하기 위해서는 자유도 분석이 필요하다. 본 연구에서는 6개의 구조적 변수와 4개의 운전변수로 이루어진 총 10개의 자유도가 표1에 분석되었다. Petlyuk 구조적 설계방법은 다음과 같이 실시한다. 첫째 전처리탑 경우 액체원료의 조성을 원료투입단 조성으로 하고 그 보다 1단 위쪽은 원료의 조성 과 평형을 이루는 증기의 조성을 그 단의 액체 조성으로 하여 stage to stage 계산법으로 원료 공급단의 위 단들의 액체조성을 하나씩 계산한다. 전환류 운전하에서는 증류탑의 분리효율이 가장 높고 증류탑내 조성분포가 평형관계만으로 계산되기 때문이다. 이렇게 하여 전처리탑의 상부 조성은 식(1)로부터 계산할 수 있다.

$$x_{n+1,i} = \alpha_{i,1} x_{n,i} / \sum_j \alpha_{j,1} x_{n,j} \quad (1)$$

전처리탑의 하부의 조성분포는 반대로 원료 투입단에서 1단 아래의 단의 증기 조성이 액체 원료의 조성 과 같은 것으로 하여 순서대로 1단씩 내려가면서 식(2)로부터 계산한다.

$$x_{n-1,i} = x_{n,i} / \left[\alpha_{i,1} \sum_j (x_{n,j} / \alpha_{j,1}) \right] \quad (2)$$

전처리탑의 상부와 하부의 조성분포를 계산하고 주탑과의 연결단은 주탑의 조성분포를 계산한 후 결정한다.

다. 주 탑의 설계에서 Fenske 다성분 설계식 (3)이 적용되어졌다.

$$N_{\min} = \frac{\log \{ [x_{i,N+1} / x_{i,1}] [x_{j,1} / (x_{j,N+1})] \}}{\log \alpha_{i,j}} \quad (3)$$

Table 1. Degree of freedom analysis

Unknowns	Number
Numbers in trays	6(NT,NT ₂ ,NF,NP,NR,NS)
Flow rate splits(Ls,Vs)	2
Liquid composition(x _{n,i})	(NT+NT ₂ +2)NC
Vapor composition(y _{n,i})	(NT+NT ₂ +1)NC
Vapor boilup rate(V _B)	1
Reflux flow rate(L _D)	1
Total	(2NT+2NT ₂ +3)NC+10
Equations	Number
Component material balance	(NT+NT ₂ +2)NC
Equilibrium relation	(NT+NT ₂ +1)NC
Total	(2NT+2NT ₂ +3)NC
Degrees of freedom	10

주 탑의 조성계산은 Side product조성을 포함하는 잔류 곡선을 따르기 위해 중간 제품의 농도를 기준으로 상부와 하부의 조성을 전처리탑과 동일하게 계산한다. 전처리탑과 주탑의 연결단은 두 탑의 조성분포를 비교하여 계산하는 데 전처리 탑 양쪽끝 조성 과 상부와 하부단과 가장 가까운 조성을 가지는 주 탑의 단 위치를 찾아서 알아낸다.

이렇게 결정된 전처리탑의 상부조성과 하부조성의 단수를 합하면 전처리탑의 전체단수가 되고 원료의 공급단은 상부와 하부의 단수를 비교하여 결정한다.

그림2에 납사 분리공정의 Petlyuk column 단수 결정을 위한 평형 증류단 조성분포를 표시하였다. 그림에서 F로 표시된 것이 원료단의 조성이고 D는 상부 제품의 조성, B는 하부 제품의 조성, S는 중간 제품의 조성을 나타낸다. 그리고 +로 표시한 것이 전처리탑 내부의 평형 조성분포이고 o로 표시한 것은 주탑 내부의 평형 조성분포이다. 그림2에서 전처리탑 상부쪽으로 2번째의 +가 주 탑의 조성 과 근접하므로 이 단을 전처리탑 최상부단으로 결정하고 최하부단은 12번째로 결정한다. 또한 주탑과 전처리탑의 연결단은 가장 조성이 비슷한 단으로 결정한다. 그리고 실제 단수는 계산된 최소단수에 2배로 하여 결정한다.[10]

표2에 본 연구의 Petlyuk column 단수 결정 결과 가 정리되어 있다. 최소단수로부터 계산된 단수는 운전조건

으로 모사한 계산에서 약간 수정되었으며 괄호 안에 있는 값이 수정된 단수이다.

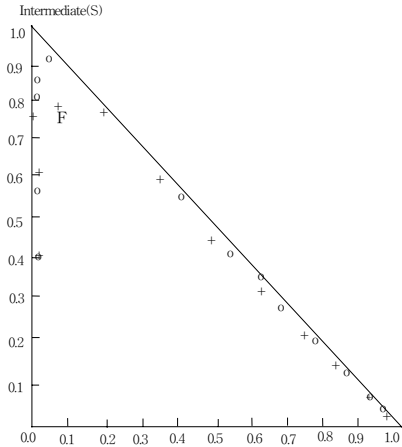


Fig. 2. Liquid composition profile in minimum trays

Table 2. Result of structural design.

	Prefractionator	Main Column
No. of trays	12	28(32)
Feed/Side product	8	24
Interlinking stages		3/28

전처리탑의 8단에 원료가 공급되고 주탑의 24단에서 중간비점의 제품이 생산된다. 주탑의 3단과 전처리탑의 상부와 연결되고 28단은 전처리탑의 하부와 연결된다.

3. 결과 및 고찰

정유공정 상압증류탑에서 나오는 Full range Naphtha 유분에는 여러 가지의 Hydrocarbon 성분이 혼합되어 있고 이를 각각의 경질납사, 중질납사, Kerosine 제품의 비등점 규격에 제품 및 반제품으로 생산해낸다. 본 연구의 장치에 공급되는 원료 유분은 20가지의 NBP구간으로 표시 하였고 그 결과는 표3과 같다. 저비점 제품은 경질 납사 제품으로 납사크래킹 공정의 원료로 사용되고, 중간비점 제품인 중질납사는 납사개질공정의 원료로 사용된다 그리고 고비점 제품의 Kerosine 반제품 유분은 등유제품의 Blending으로 사용되고 있다.

표 3에는 원료의 비등점 조성과 함께 제품 및 반제품의 조성도 포함되어 있는 데 이러한 제품을 생산하기 위해서는 열복합 증류탑 증류 모사를 반복 계산하여 요구되는 규격을 만족하면서 에너지 사용이 적은 운전 조건을 찾아야 한다. 이러한 계산을 위해 본 연구에서는 상업용 공정 모사 소프트웨어로 Aspen HYSYS를 사용했으며 표 4의 운전 조건에서 요구되는 제품을 얻었다.

그림 3은 Aspen HYSYS로 모사하여 실행한 Petlyuk column PFD 화면이다. 그림에서 왼쪽에 있는 증류탑이 전처리탑이고 오른쪽에 있는 증류탑이 주탑이다. 두 탑의 단수와 연결단 위치, 전처리탑의 Feed 단수 및 중간비점 제품의 공급단 위치는 표 2에 제시 하였다.

그림 3에서 D로 표시한 것이 저비점 제품, S로 표시한 것이 중간 비점 제품, B로 표시한 것은 고비점 제품이며 원료의 공급량은 표 4에서 제시되었고, Feed의 조성이 표 3에서와 같을 때 저비점, 중간비점, 고비점 제품은 표 3에 제시된 대로 얻어졌다.

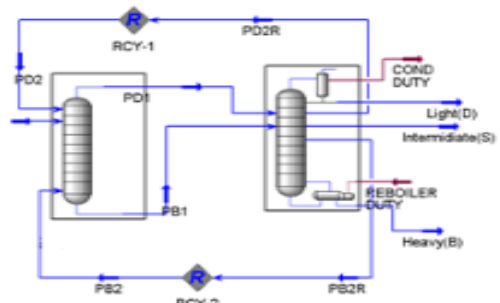


Fig. 3. Schematic of a Petlyuk column in Naphtha splitter unit.

Table 3. Composition of feed and product (mole%)

Component	F	D	S	B
(Light)				
NBP[42℃]	1.56	18.02	0.21	0.00
NBP[49℃]	1.87	17.24	0.70	0.00
NBP[57℃]	2.85	16.87	2.00	0.00
NBP[64℃]	5.15	17.66	4.92	0.00
(Intermediate)				
NBP[71℃]	8.79	17.76	9.65	0.00
NBP[78℃]	9.20	9.26	11.03	0.00
NBP[86℃]	8.54	2.70	10.84	0.00

NBP[93℃]	8.20	0.45	10.62	0.00
NBP[100℃]	7.95	0.05	10.34	0.01
NBP[107℃]	7.56	0.00	9.82	0.08
NBP[114℃]	6.89	0.00	8.89	0.40
NBP[122℃]	6.39	0.00	7.90	2.04
NBP[129℃]	6.40	0.00	6.65	8.37
NBP[136℃]	5.46	0.00	3.69	17.05
NBP[144℃]	4.38	0.00	1.69	20.05
NBP[151℃]	3.63	0.00	0.77	19.74
(Heavy)				
NBP[158℃]	1.93	0.00	0.22	11.48
NBP[165℃]	1.20	0.00	0.05	7.58
NBP[173℃]	1.04	0.00	0.01	6.68
NBP[180℃]	1.00	0.00	0.00	6.52

여기서 얻어진 전처리탑과 주탑의 액체조성의 분포를 정리한 것이 그림 4이다. 그림에서 +로 표시된 것이 전처리탑의 조성이며 o 표시는 주탑의 조성을 나타낸다. F로 표시한 부분이 원료의 조성이고 이것과 가장 가까이 있는 +가 원료 공급단의 조성이다. 원료의 조성과 원료 공급단의 조성이 근접한 것은 원료 공급단에서 성분간의 혼합 현상이 일어나지 않는다는 것을 의미하며 Petlyuk column의 증류효율이 높은 것도 혼합 현상이 적기 때문이다. 이로 인해 Petlyuk column 시스템 경우 동일한 원료 처리 조건에서 일반 증류탑 방식에 비해 에너지 비용이 적게 사용한다는 것을 확인할 수 있다.

Petlyuk column의 운전 방법은 원료를 시간당 2,259 kgmole 씩 전처리탑 8단에 공급하고 주탑의 28번째의 단으로부터 시간 당 3,711kgmole 씩 증기를 유출하여 전처리 탑의 하부로 공급한다. 이 증기를 사용하기 때문에 전처리탑은 재비기를 사용할 필요는 없다. 또 주탑의 3번째단에서 액을 시간 당 1723 kgmole씩 유출하여 전처리탑 상부로 공급한다. 이로 인해 전처리탑은 냉각기를 필요로 하지 않는다. 전처리탑 상부에서 발생된 증기는 주탑 3단에 공급하고 하부의 유출액은 주탑 28단에 공급한다. 주탑에서 중간 비점 제품은 24단에서 생산된다. 에너지 절감 효과를 파악하기 위하여 납사분리 공정의 기존 증류 탑 모사를 그림 5와 같이 구성하여 Aspen HYSYS로 모사한 결과를 표 5에 나타내었다.

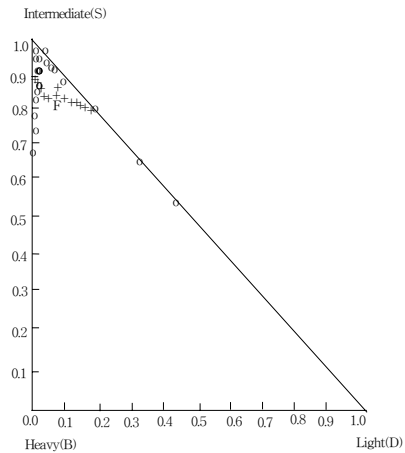


Fig. 4. Liquid composition profile of petlyuk column in Naphtha splitter unit.

Table 4. Operation condition of a Petlyuk column

(kg-mole/hr)	Prefractionator	Main column
Feed	2,259	
Overhead product		175
Side product		1734
Bottom product		350
Reflux	1723	2726
Vapor boilup	3711	3669
Reboiler duty (Gkcal/hr)		31.00

Table 5. Operating condition of a direct sequence system

(kg-mole/hr)	1st Column	2nd Column
Feed	2,259	2084
Overhead Product	175	1737
Bottom Product	2084	347
Reflux	350.0	638
Boilup	1672	2632
Reboiler Duty(Gkcal/hr)	13.01	21.80

그림 6은 기존 증류탑을 모사한 납사분리공정의 탑내 액의 조성분포를 도시한 것이다. 원료의 조성과 원료의 공급단의 조성 거리가 짧은 그림4와는 달리 그림6에서는 원료의 조성과 공급단의 위치가 멀어 원료공급단에서 Mixing 현상이 일어나 에너지 분리 효율이 떨어진다는 것을 알 수가 있다. 이렇게 조작하여 얻은 제품의 조성은 표3에 제시된 제품의 조성고 동일하다. 본 연구에서 제시하는 것은 동일한 연료를 가공하여 동일한 제품을 생

산하면서 기존의 증류방식에 비해 적은 에너지를 생산한다는 것이다. 표 5에서 기존 증류탑과 비교한 결과 에너지 사용량이 적다는 것을 알 수 있다. 여기서 얻은 수치는 Pilot Plant에서 실험한 수치는 아니지만 세계 유수한 화학 플랜트 엔지니어링사가 사용하는 공정 모사소프트웨어임을 감안하면 실제 공정에서도 비슷한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

같은 원료를 그림 5의 기존 증류탑 장치로 처리하였을 때 필요한 에너지 양은 첫 번째 증류탑에서 13.01 Gkcal/hr, 두 번째 증류탑에서는 21.80 Gkcal/hr 가 필요하나 Petlyuk column을 사용할 경우 31.00 Gkcal/hr가 필요해 12.3%의 에너지 절감 효과를 얻을 수 있다. 국내 수입 처리하는 경질납사 및 중질납사량은 하루기준 90,000톤이므로 이를 FRN유분으로 대체 수입 하여 분리 처리 경우 하루의 에너지 절감 비용은 5,700만원, 년 200억에 상당한다. 또 Reboiler와 Condenser의 설비 용량을 줄일 수 있어 설치 투자비도 부수적으로 절감할 수 있다.

4. 결론

정유공정에서 대량으로 처리되는 FRN유분을 용도별로 분리 생산하는 공정을 Petlyuk column을 사용하는 공정으로 대체하는 방안을 제시하였다. 기존의 Petlyuk column 연구 경우 대상공정의 원료 및 제품 규격이 성분으로 표시되는 화학공정에 많이 적용되었으나 TBP (True Boiling Point) 분석을 통한 비점 범위로 원료 및 제품의 규격이 표시되는 공정에 대해서는 많이 적용되지 않았다. 제시된 설계 방식으로 새로운 납사 분리 공정을 구성할 수 있었으며 새로운 Petlyuk column을 사용하면 기존의 증류탑에 비해 12.3%의 에너지 절감 효과를 얻을 수 있다.

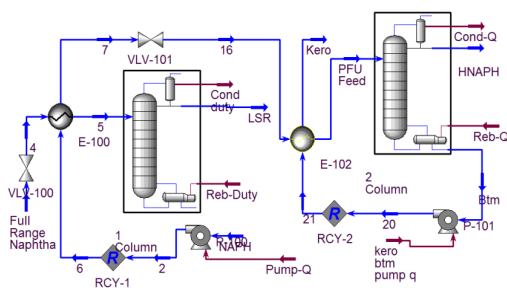


Fig. 5. Schematic of a direct sequence in Naphtha splitter unit

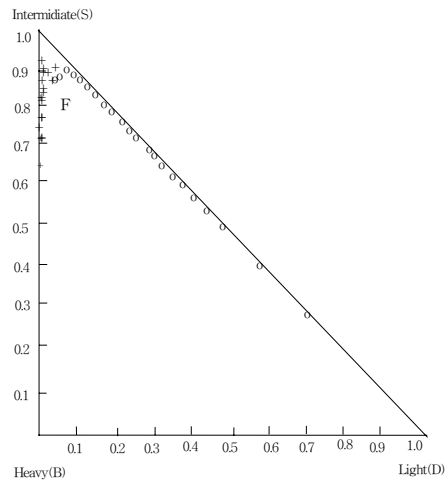


Fig. 6. Liquid composition profile in a direct sequence system

References

- [1] R.Smith, "Chemical process design," pp. 129, McGraw-Hill Book Co., N. Y., 1995.
- [2] W.D. Seider, J. D. Seader and D.R. Lewin, "Process design principle," pp. 141, John Wiley & Sons, Inc., N. Y., 1999.
- [3] Y. H. Kim, "Structural design of extended fully thermally coupled distillation columns," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 40, pp. 2460-2466, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie000791d>
- [4] Y. H. Kim, "Structural design and operation of a fully thermally coupled distillation column," *Chem. Eng. J.*, vol. 85, pp. 289-301, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(01\)00170-X](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(01)00170-X)
- [5] Kim, Y. H., "An Alternative Structure of a Fully Thermally Coupled Distillation Column for Improved Operability," *J. Chem. Eng., Japan*, 36, 1503, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1252/jcej.36.1503>
- [6] Widagdo, S., Seider, W. D., "Azeotropic Distillation", *AIChE J.*, vol. 42, no. 1, pp. 96-130, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.690420110>
- [7] Glinos, K., Malone, M. F., "Optimality Regions for Complex Column Alternatives in Distillation System", *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 66, no. 3, pp. 229, 1988.
- [8] Triantafyllou, C., Smith, R., "The Design and Optimization of Fully Thermally Coupled Distillation Columns," *Trans IChemE*, 70, part A, pp. 118-132, 1992.
- [9] Kim, Y. H., M. Nakaiwa and K. S. Hwang.; "Approximate Design of Fully Thermally Coupled Distillation Columns," *Korean J. Chem. Eng.*, 19, pp. 383-390, 2002.

DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02697144>

- [10] J. D. Seader, E. J. Henley, "Separation process principles," pp. 510, John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 1998.
-

이 주 영(Ju-Yeong Lee)

[정회원]



- 1995년 2월 : 부산대학교 화학공학과(공학석사)
- 1995년 1월 ~ 2010년 2월 : SK에너지 재직
- 2010년 2월 : 부산대학교 화학공학과(공학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학 환경화학공학과 부교수

<관심분야>

장치설계, 화학공정모사, 에너지 진단