

Reformate 분리공정에서의 열복합 증류탑 제어구조에 관한 연구

이주영^{1*}

¹울산과학기술대학교 환경화학공학과

Study on Control Efficiency of Thermally Coupled Distillation Column for Reformate Fractionation Process

Ju-Yeong Lee^{1*}

¹Department of Environmental & Chemical Industry, Ulsan College

요 약 Reformate 분리 공정에 대한 열복합 증류탑의 가능한 제어 구조를 조사하고 그 제어 성능을 검토하기 위하여 동적 모사를 수행하였다. Aspen HYSYS를 사용하여 3x3 제어구조를 적용하여 여러 가지 제어구조로 동적 모사한 결과 Reformate 분리 공정 주탑의 상부, 중간, 하부 제품 조성은 각각 reflux flow rate, 주탑에서 전처리탑 상부로 흐르는 liquid draw rate, vapor boilup rate로 제어되는 구조가 가장 운전 안정성이 확보됨을 확인하였다.

Abstract A dynamic simulation of a fully thermally coupled distillation is conducted for the design of a possible operation scheme, and its performance is examined with an example process of reformate fractionation process. The outcome of the dynamic simulation indicates that the column can be operated by using a 3x3 control structure. The structure consists of three controlled variables of the compositions of overhead, side products and bottom and three manipulated variables of the flow rate of reflux, liquid split ratio between a main column and a prefractionator and steam.

Key Words : Thermally coupled distillation, Fractionation process, Dynamic Simulation

1. 서론

열복합 증류탑(Fully Thermally Coupled Distillation Column : FTCDC)의 개념은 반세기 전에 소개되었고 petlyuk column으로 잘 알려져 있다. 열복합 증류탑은 기존의 방식에 비해 약 30%의 에너지 절감효과를 얻을 수 있으며, 많으면 60%까지 절감할 수 있다고 알려져 있어, 에너지 절감을 위한 기존의 접근방법이 가지는 한계를 획기적으로 극복하면서, 가장 실현 가능성이 높은 방법으로 주목 받고 있다.

그러나 실용적인 이용은 설계와 운전상의 어려움으로 인하여 이런 장점에도 불구하고 실제 현장에서의 실제 적용은 독일 BASF 공장 및 일본 KYOWA 회사에서만

일부 사용하고 있는데 그 이유는 열복합 증류탑이 실제로 현장에서 조업에 활용될 때 발생하는 증류탑 운전의 어려움 및 제품의 규격을 유지하기 위한 제어문제의 복잡함 등의 난제가 가로막고 있었기 때문이다[1].

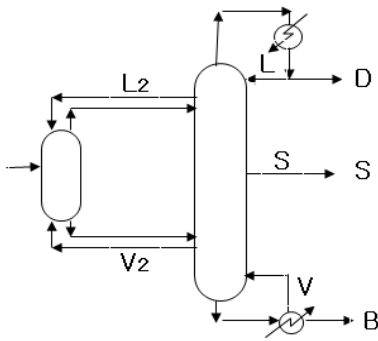
Halvorsen and Skogestad(1997)은 열복합증류탑이 최적 운전 상태에서 feed 조성을 달리 했을 경우 전처리탑 와 주탑의 각 tray에서의 조성 및 온도 변화와 최적운전 조건과의 상관관계를 연구하였다. 또한 각종 외란 변화 등에 대한 운전 sensitivity를 고찰하여 feed 조성 변화 시 sensitivity가 크게 변화되고 외란 발생 시 정상 상태 최적 운전 상태의 영역 범위가 매우 좁아 어떤 외란에서는 control이 어렵다는 것을 보여주었다[1].

본 논문은 2011년도 울산과학기술대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

*Corresponding Author : Ju-Yeong Lee

Tel: +82-10-4021-7138 email: jylee@uc.ac.kr

접수일 12년 03월 06일 수정일 (1차 12년 07월 05일, 2차 12년 07월 23일, 3차 12년 07월 27일) 게재확정일 12년 08월 09일



[그림 1] 열복합 증류탑 배치도 (F: 원료, D : 상부 제품, B:중간제품, S:하부 제품)
 [Fig. 1] Schematic of a fully thermally coupled distillation column (F: Feed, D:overhead product, S:side product, B:bottom product)

Abdul Mutalib 와 R. Smith(1998)는 dividing wall system 이 설치가 용이하나 탑 내부의 전처리탑과 주탑의 tray 개수가 같거나 근접할 경우 어려움이 존재한다는 것과 dividing wall system에서는 다른 구조와는 달리 liquid와 vapor flow split 제어가 힘들다는 것을 발견하였다[2,12].

Agrawal 와 Fidkowski(1998)는 주탑과 전처리탑 간의 vapor flow에 따른 열복합 증류탑 운전의 영향을 고찰하였는데 주탑과 전처리탑간의 압력차가 큰 영향을 끼친다는 것을 밝혔다[3].

본 연구에서는 여러 가지 제어 구조에 따른 제어 성능 평가를 통하여 열복합 증류탑 운전의 동특성을 검토하여 열복합 증류탑 운전의 안정성을 입증하고 상용화 가능성도 모색하고자한다.

2. 열복합 증류탑 구조설계

나프타 개질공정에서 나오는 reformato 유분은 총 14 개 성분으로 혼합되어 있고 이 feed 유분을 열복합 증류탑을 사용하여 벤젠, 톨루엔이 다량 포함된 C5~C7 반제품, Xylene 제품, C9+ 방향족 제품으로 각각 분리하고자한다. 성분은 14개이지만 비점과 함량에 따라 C5~C7 반제품인 저비점 혼합물, xylene인 중간비점 혼합물, 나머지 고비점 혼합물의 3가지로 분류한다.

열복합 증류탑 설계에 관한 연구는 최소환류량을 계산하여 탑을 설계하는 연구[4,5]가 많았으며 탑의 구조적 설계에 관한 연구는 3-column 모델을 이용한 Smith 교수팀의 연구[6]가 처음이었다. 증류탑 내 액의 조성분포가 평형증류 조성곡선과 유사하면 탑내에서의 stream의 혼

합이 최소가 되어 탑효율을 극대화할 수 있으며 국내의 Kim 교수팀이 다성분 평형증류곡을 이용한 구조적 설계 방법을 제시하였고[7,8], 본 연구에서는 이 설계법을 이용하여 열복합증류탑을 설계한다.

[표 1] 열복합증류탑 구조 계산 및 운전조건 결과
 [Table 1] Result of structural design and operating conditions.

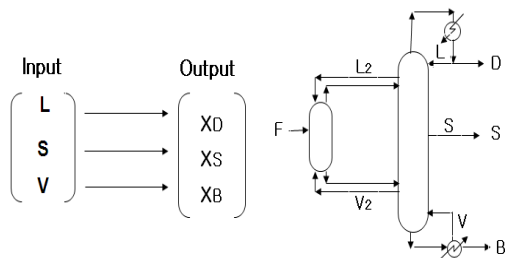
Name	Prefractionator	Main Column
Structural Design		
number of trays	34	120
feed/side product	16	40
inter linkage stages		26/110
Operating conditions		
feed(kg/hr, x10 ⁴)	12.98	
overhead(kg/hr, x10 ⁴)		3.29
bottom(kg/hr, x10 ⁴)		3.22
side(kg/hr, x10 ⁴)		6.47
reflux(kg/h, x10 ⁴ r)	0.73	24.07
vapor boilup(kg/hr, x10 ⁴)	83.7	36.46
heat duty(kcal/hr, x10 ⁶)		26.44

기존 증류탑 설계에서는 최소 환류의 1.2 내지 2.0배 범위의 환류값을 사용하여 단수를 계산하며 증류탑의 단수를 쉽게 얻을 수 있지만 열복합증류탑 설계 경우 연결단의 위치와 연결 stream들의 조성이 불분명하여 사용할 수 없다. 열복합증류탑은 전처리탑과 주탑으로 이루어져 있으며 두 탑의 단에서 액체조성이 다성분계 평형증류곡선과 유사하면 증류공정의 열역학적 효율은 최적이 된다. 전처리탑의 구조설계는 일반적인 증류탑 설계방법을 이용할 수 없는 데 탑상부와 하부의 마지막 조성을 알 수 없기 때문이다. 원료공급단의 조성을 맞추기 위해 원료공급단에서 stage-to stage 계산법으로 원료공급단의 각 단들의 액체조성을 하나씩 계산한다. 통상적인 설계 가이드라인에 따라 시스템의 상대휘발도를 이용하여 구한 최소 유량의 1.2~2배를 사용하여 액체, 기체유량을 구한다 [11]. 증기조성은 Aspen HYSYS에서 peng-robinson 식으로 구한다. 전처리탑의 상부와 하부의 조성분포 및 주탑의 조성 분포를 계산하고 연결단은 두 탑의 조성 분포를 비교하여 가장 근접하는 단을 연결한다. 본 연구에서는 설계가이드에 따라 계산된 전처리탑, 주탑의 단수에 1.7을 곱하였다. 증류탑의 구조적 설계를 통한 결과가 얻어지면[13,14], 주어진 제품 조성을 생산할 수 있는 증류탑

의 운전 조건은 Aspen HYSYS simulator를 통해 구할 수 있다[Table 1]. 상업 공정인 reformate 분리공정에서의 열복합증류탑 정적 모사의 자세한 과정과 결과는 참고문헌 [9]에 자세히 서술하였다.

3. 동적모사 및 제어구조 특성고찰

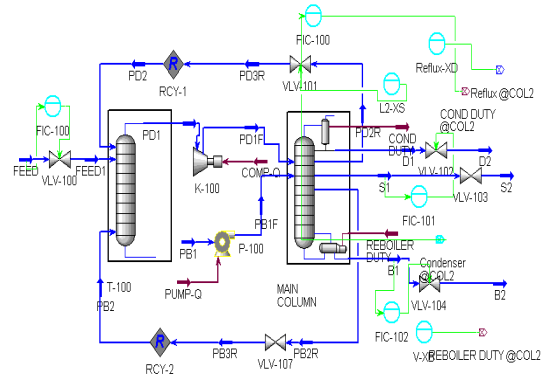
reformate 분리공정에서 가장 중요한 제어 변수는 상부, 중간, 하부 제품(overhead, side product, bottom; D,S,B)의 주성분들의 조성이고 출력변수들에 대한 입력 변수들로 조절변수의 조절에 대하여 상대적으로 동적응답이 빠르고 값이 큰 제어 변수와 짝지음을 하도록 제어 구조를 설정한 후 여러 외란에 대하여 공정내의 주요 stream들의 조성 변수들을 관찰하여 제어 구조를 설정한다. 3X3 제어구조에서 기본 구조는 상부 제품의 대표적인 조절변수는 reflux flow rate(L)이고, 중간제품의 가능한 조절변수들로는 side draw rate(S), liquid draw rate(L₂), vapor draw rate(V₂), vapor boilup rate(V)로, 하부제품의 가능한 조절변수는 vapor boilup rate(V), side flow rate(S)등이 가능하다. Wolff and Skogestad[10]는 그림2과 표2에서 보는 것처럼 3x3 제어로 X_D-X_S-X_B 출력과 L-S-V 입력의 구조를 사용하였다. 본 연구에서는 제시 가능한 다른 조절변수들을 구성하여 기존의 LSV 제어구조의 LVS, LL₂V, LV₂S 제어구조를 탐색하고 각 제어구조의 동적특성을 평가하여 제어가능성을 검토하였다. 이를 위해 그림 3에서와 같이 정상 상태 공정에서 7개의 PID 제어루프를 설치하였다.(3개의 조성제어기, 2개의 유량제어기, 1개의 온도제어기, 1개의 압력제어기) 또한 HYSYS에서 흐름은 공정 동안 내내 압력강하에 의해 결정되어 있기 때문에 흐름을 모사하기 위해 송풍기, 펌프와 같은 장치를 설정하여 압력강하를 모사하였고 압력 흐름에 관계없이 연결되어 있는 단위 공정들의 material stream을 확인하기 위하여 6개의 밸브가 추가되었다.



[그림 2] 열복합증류탑의 LSV 제어구조도
[Fig. 2] LSV control structure for FTCDC

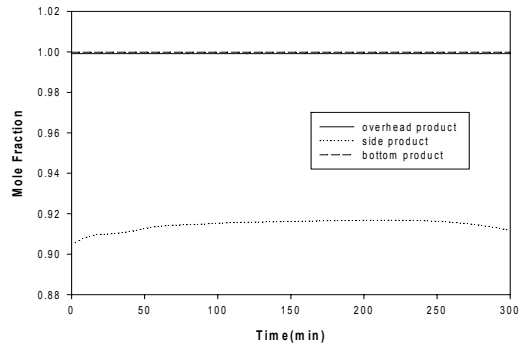
[표 2] 열복합증류탑의 3x3 LSV 제어구조
[Table 2] 3x3 control structure for FTCDC

Input variables	Output variables
reflux flow rate(L)	overhead product composition
sidestream flow rate(S)	side product composition
vapor boilup rate(V)	bottom product composition

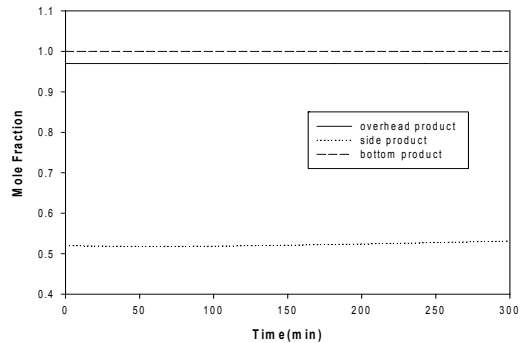


[그림 3] Reformate 분리공정의 열복합 증류탑 동적모사 개략도

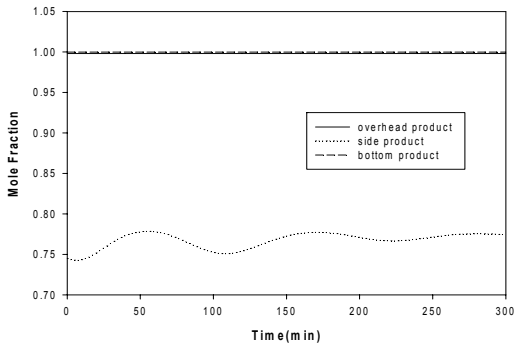
[Fig. 3] A process diagram of dynamic simulation of the FTCDC in the reformate fractionation process.



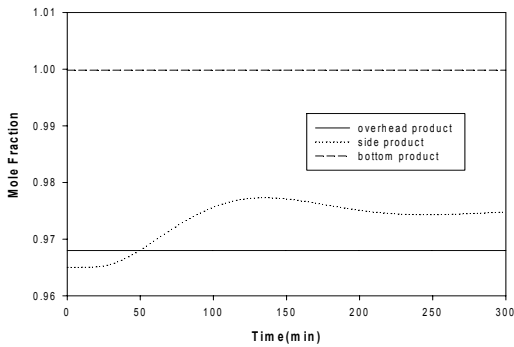
(a) LSV control structure



(b) LVS control structure



(c) LV₂S control structure

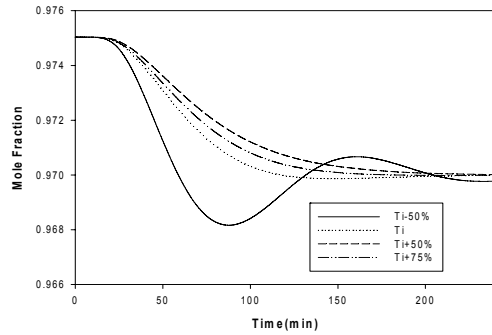


(d) LL₂V control structure

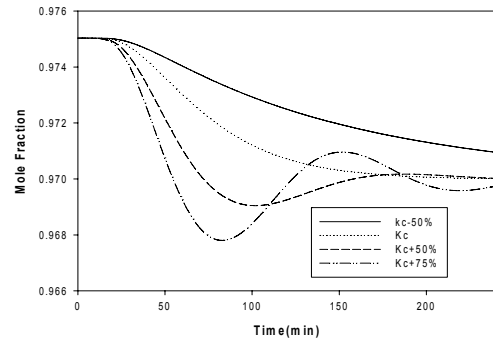
[그림 4] 여러 제어구조하에서의 동적모사 결과
[Fig. 4] Results of dynamic simulations from possible control structures

조성제어의 파라미터값은 Ziegler-Nichols tuning 방법을 기반으로 하여 계산하였고 PI 제어로 설정하였다. Kc 와 Ti 값은 -50% ~ +70%로 변화폭을 주었다. 제어 응답은 Kc를 -50% 만큼 감소시키는 것보다 +75% 증가시키는 것이 중간제품 조성제어에 대해 더 민감한 반응을 보이는 것을 알 수 있다. Ti는 -50% 감소시키는 것이 조성변화폭을 크게 하지만 전체적으로 큰 오르내림이 없기 때문에 Kc와 Ti 변화에 대해 공정의 흔들림이 적어 매우 안정한 제어를 할 수 있다는 것을 알 수 있다[그림 5,6].

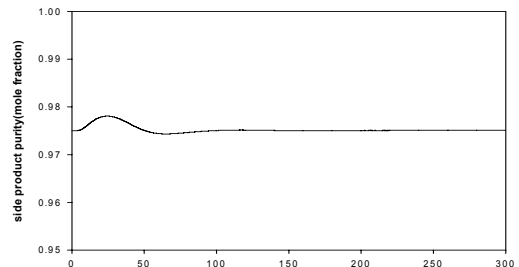
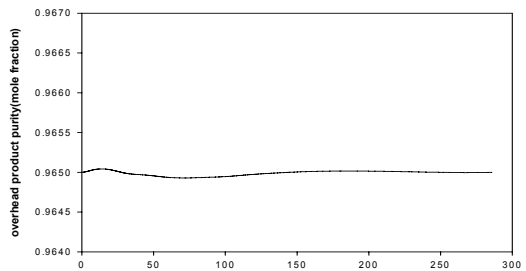
LL₂V 제어구조에서 feed flow 단위 계단 변화에 따른 상부, 중간, 하부 제품 조성 제어기의 응답을 모사하였다 [그림7]. feed flow +11% step change 시 overhead product purity는 +0.00004, side product purity는 +0.003, bottom product purity는 -0.0007정도의 상대적으로 훨씬 작은 변화폭을 보였을 뿐만 아니라 빠른 시간내에 set point에 도달하는 것으로 보아 feed flow step change 조건에서도 LL₂V 제어구조는 효율적으로 잘 제어된다는 것을 확인하였다.

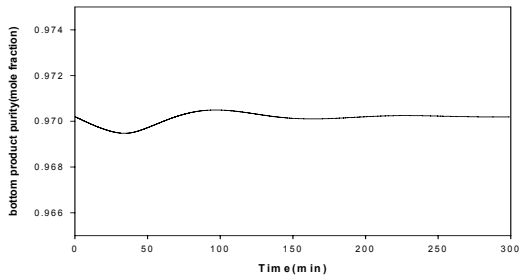


[그림 5] 중간제품 조성 제어기의 비례이득값에 따른 응답
[Fig. 5] The change of side product purity with different gain using the manipulated variable of liquid draw rate.



[그림 6] 중간제품 조성 제어기의 리셋시간값에 따른 응답
[Fig. 6] The change of side product purity with different reset time using the manipulated variable of liquid draw rate.





[그림 7] 처리량 계단 변화에 따른 상부, 중간, 하부 제품 조성 제어기 응답

[Fig. 7] The response of overhead, side, bottom product with variation of feed flow rate.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 열복합증류탑의 가능한 제어구조를 찾기 위하여 reformate 분리공정을 대상으로 공정을 설계하고 범용공정모사기인 HYSYS를 이용하여 대상공정을 모델링하였으며 동적모사를 통한 증류탑의 제어성능을 검토하였다. 기존의 LSV구조를 바탕으로 LVS, LV₂S, LL₂V 제어구조의 동적모사를 수행한 결과 가능한 제어구조 중에서 가장 만족스러운 제어구조는 LL₂V 제어구조로 상부제품은 reflux flow rate로, 중간제품조성은 liquid draw rate로, 하부제품 조성제어는 vapor boilup rate를 조절변수로 사용하는 것이 가장 효율적인 제어구조임을 알 수 있었다.

References

[1] Ivar J. Halvorsen and Sigurd Skogestad, "Optimal operation of Petlyuk distillation" Computers. chem. Engng. Vol.21 (2000)

[2] Abdul Mutalib, M. I., & Smith, R.; "Operation and control of dividing wall distillation columns" Part I. Degrees of freedom and dynamic simulation. Transactions IChemE, 76, 308 (1998)

[3] Agrawal R. and ZT Fidkowski, "More operable arrangements of fully thermally coupled distillation columns", Ind. Eng. Chem. Res, Vol 44, No.11, 2565-2568 (1998)

[4] Fidowski, Z and Lrolkowski, L., "Thermally Coupled System of DSistillation Columns: Optimization Procedure", ALChE J., 32, 537-546(1986)

[5] Glinos, K. and Malone, M. F.; "Optimality Regions for Complex Column Alternatives in Distillation System," Chem Eng Res Des, 66, 229 (1988)

[6] Triantafyllou, C. and Smith, R.; "The Design and Optimisation of Fully Thermally Coupled Distillation Columns," Trans IChemE, 70, part A, 118-132 (1992)

[7] Y. H. Kim, "Structural design of extended fully thermally coupled distillation columns," Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 40, pp. 2460-2466, 2001.

[8] Y. H. Kim, "Structural design and operation of a fully thermally coupled distillation column," Chem. Eng. J., Vol 85, pp. 289-301, 2002.

[9] J.Y.Lee, "Design of Reformate Fractionation Process with Thermally Coupled Distillation Column," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society., Vol. 12, No 5pp. 2445-2450, 2011

[10] Woof, E. A. and S. Skogestad. "Control Configuration Selection for Distillation Columns under Temperature Control", Ind. Eng Chem. Res., 34, 2094-2103, 1995

[11] Petlyuk FB, Danilov RY.; "Theory of Distillation Trajectory Bundles and its Application to the Optimal Design of Separation Units: Distillation trajectory Bundles at Finite Reflux", Chemical Engineering Research & Design, Vol.79, No.7 , pp.733 -746 (2001)

[12] Muralikrishna K, Madhavan KP, Shah SS.; "Development of dividing wall distillation column design space for a specified separation" Chemical Engineering Research & Design, Vol.80, No.2 , pp.155 -166 (2002)

[13] Fidkowski ZT, Agrawal R.; "Multicomponent thermally coupled systems of distillation columns at minimum reflux" AIChE Journal, Vol.47, No.12, pp.2713-2724 (2001)

[14] Amminudin KA, Smith R, Thong DYC, Towler GP.; "Design and Optimization of Fully Thermally Coupled Distillation Columns, Part 1 : Preliminary Design and Optimization Methodology" Chemical Engineering Research & Design, Vol.79, No.7, pp.701 -715 (2001)

이 주 영(Ju-Yeong Lee)

[정회원]



- 1995년 2월 : 부산대학교 화학공학과(공학석사)
- 1995년 1월 ~ 2010년 2월 : SK 에너지 재직
- 2010년 2월 : 부산대학교 화학공학과(공학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 환경화학공학과 조교수

<관심분야>

장치설계, 화학공정모사, 에너지 진단