

### 3기 증류탑의 배열을 이용한 열통합 증류탑 설계

이승현, 홍승택, 이문용\*  
 영남대학교  
 (mynlee@yu.ac.kr\*)

#### Design of Thermally Coupled Distillation Column Using a Three Conventional Simple Column's Configuration

Seunghyun Lee, Seungtaek Hong, Moonyong Lee\*  
 Yeungnam Univ.  
 (mynlee@yu.ac.kr\*)

#### 서론

분리벽형 증류탑은 3성분 이상의 혼합물 분리에 있어서 기존의 2TOP구조에서 발생하는 remixing 현상을 줄여 많은 에너지 절감 효과를 얻을 수 있는 차세대 복합 증류탑이다. 이러한 장점을 가진 분리벽형 증류탑은 일반 단순 증류탑과 달리 열적으로 통합된 구조를 갖고 있어 구조설계에 있어서 많은 어려움이 있는 실정이다. 이를 위해 현재 구조설계에 대한 많은 연구가 이루어지고 있지만 계산과정이 복잡하고 많은 최적인자를 필요로 하고 있어 보다 효율적이고 간편한 구조설계 방법이 필요하다. 따라서 DWC의 초기 구조설계에 있어서 보다 효과적인 구조 설계방법을 위해 3기의 단순 증류탑을 적절한 배열 확장적용에 의하여 분리벽형 증류탑과 원리상 비슷한 분리구조를 이용하여 구조설계를 하는 방법을 제시하였다.

3기의 증류탑을 이용한 분리벽형 증류탑의 구조설계는 그림 1과 같이 나타날 수 있다.

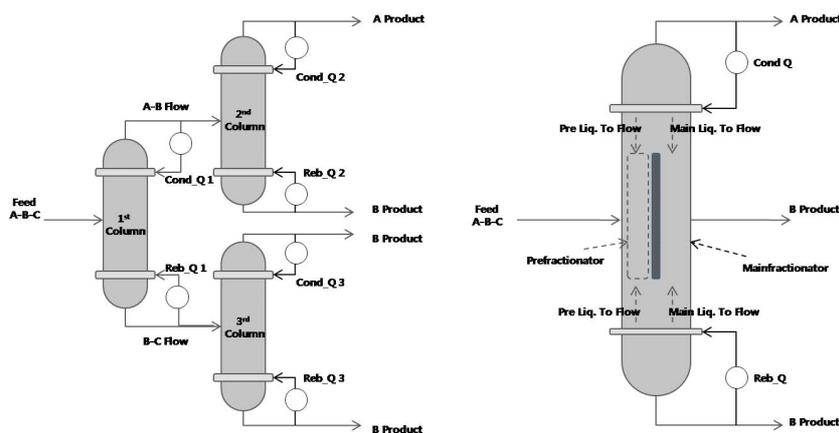


그림 1. A schematic diagram of three conventional simple column's configuration and DWC.

Three conventional simple column을 분리벽형 증류탑에 적용하기 위해서는 분리벽형 증류탑을 크게 4부분(예비분리기 부분, 분리벽 상단 부분, 분리벽 하단 부분 그리고 분리벽

구간)으로 나누어야 한다. 이러한 구조 결정을 위하여 Fenske-Underwood 식을 이용한 shortcut method를 이용하였고 그 단수결과를 rigorous sloppy case로 재구성하여 DWC 구조설계에 적용하였다.

## 본론

Shortcut case에서의 단수를 결정하기 위해서는 각각의 column에 대한 light key(LK) component 및 heavy key(HK) component의 mole-fraction을 설정하여야 한다. 이때의 총 변수는 6개이지만 그림 1.의 A product and C product purity는 2nd column의 HK 및 3rd column의 LK에 의해 정해지므로 총 4개로 줄어든다. 즉, 설계변수는 1st column의 LK in bottom 및 HK in distill, 2nd column의 LK in bottom 그리고 3rd column의 HK in distill이 된다. 이 4개의 설계변수 조합으로 B product purity specification을 만족하는 범위를 구하여야 하며 이때, 2nd column의 bottom 과 3rd column의 distill에 해당되는 중비점 물질의 조성은 설정된 side product purity specification에 만족하여야 한다. 이러한 일련의 계산과정은 프로그래밍화 하여 수행되어진다.

Shortcut sloppy case에서 구해진 단수 및 구조를 Rigorous sloppy case에 적용하면 분리벽형 증류탑의 Liq. & Vap. Internal flow의 정보를 알 수 있다. 즉, 그림 1.을 보면 분리벽형 증류탑의 분리벽을 기준으로 prefractionator와 mainfractionator에 유입되는 각각의 Liquid & Vapor flow 가 있는데 이를 3기 증류탑의 배열로 해석하면 분리벽 상단에서 분리되는 liquid flow는 각각 1st column의 reflux flow와 2nd column의 stripping liquid flow에 해당되며 분리벽 하단에서 분리되는 vapor flow는 각각 1st column의 boil-up flow 및 3rd column의 rectifying vapor flow에 해당된다. 이러한 liq. & vap. Split flow는 분리벽형 증류탑의 최적화에 필수적인 요소로서 에너지 절감에 큰 영향을 미치는 설계인자이다.

Rigorous DWC case에서는 분리벽 상단단의 liq. & vap. Split ratio를 유지한 상태에서 설계한다. 이는 분리벽형 증류탑의 최소 heat flow를 가지는 범위는 liq. & vap. Split flow가 일정한 비를 유지하는 패턴을 보이고 있어 절대량이 아닌 상대적인 비를 설계변수로 설정하여야 한다.

실험하기에 앞서 3성분 공급혼합물의 조성 및 조건 각각 (A: n-Pentane-0.2mole% / B: n-Hexane-0.6mole% / C: n-Heptane-0.2mole%)이며 45kmol/h(1atm)으로 공급된다. 또한, 최종 생산물의 조성 조건은 각각 (A:0.98mole% / B:0.985mole% / C:0.98mole%)로 설정하였다. Shortcut sloppy case에서 구한 결과값들을 바탕으로 각각의 rigorous sloppy case, rigorous DWC case and rigorous DWC global case-study에 대한 소요에너지를 그림 2.에 나타내었다.

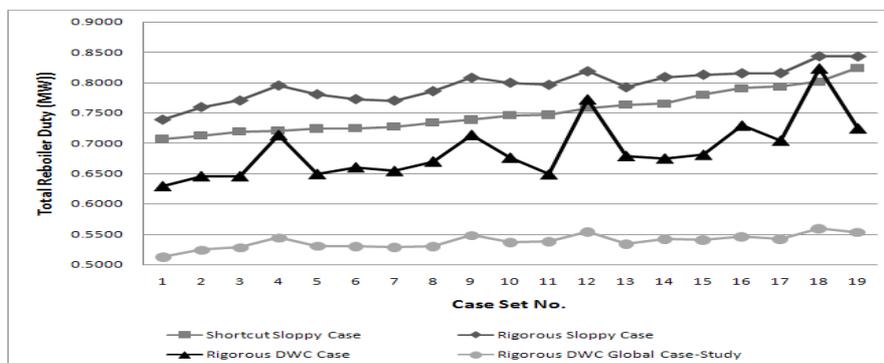


그림 2. Sloppy & DWC case Heat Flow

그림 2에서 보면 product specification을 만족하는 여러 LK/HK mole-fraction 중 shortcut sloppy case에서 최소 에너지를 소비하는 값을 가지는 case의 structure 결과 값을 rigorous sloppy 및 rigorous DWC에 적용한 결과 shortcut sloppy case에 대응되는 각각의 case에 대해서 비슷한 최소에너지를 소비하는 경향으로 나타내고 있다.

또한 rigorous sloppy case의 에너지 소비량은 rigorous DWC case와 일정한 차이를 나타내고 있는데 이는 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉, three conventional simple column의 분리 구조는 DWC의 구조와 비교해 볼 때 분리 원리상 유사한 구조를 가지고 있으므로 2nd column의 reboiler가 제외된 에너지 소비량이 DWC의 에너지 소비와 유사하여야 한다.

$$DWC Q_b \approx \sum Q_b - Q_{b2^{nd} column}$$

따라서 그림 2에서 보면 rigorous DWC case의 heat flow가 rigorous sloppy case에 비해 에너지가 적게 나타내는 것을 알 수 있다.

Rigorous sloppy case와 rigorous DWC case와의 구조적 유사성을 살펴보기 위해 각각에 대하여 온도분포 profile을 그림 3에 나타내었다.

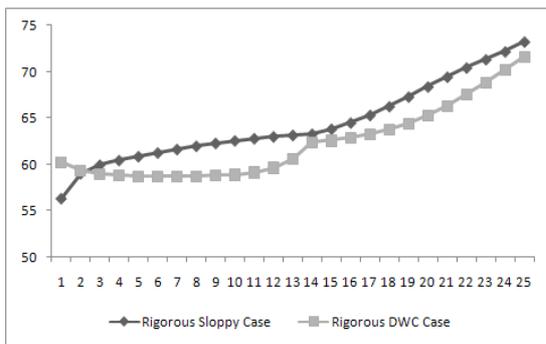


그림 3(a). Prefractionator temp. profile

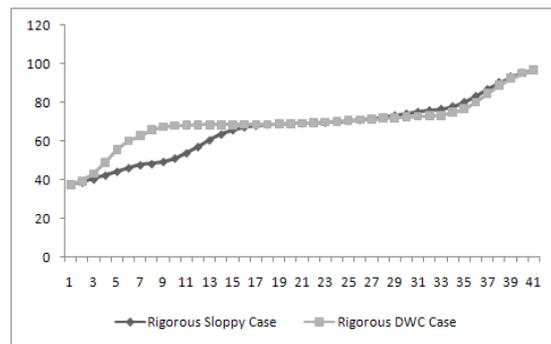


그림 3(b). Main fractionator temp. profile

그림 3에서 보면 rigorous sloppy case와 rigorous DWC case 간의 온도 프로파일이 크게 차이가 없는 것으로 나타나고 있다.

한편, Rigorous DWC global case-study는 liq. & vap. Split ratio를 고려하지 않고 최소의 에너지 소비를 나타내는 범위를 구하는 실험으로 그 분포 범위를 보면 그림 4. 와 같이 나타난다.

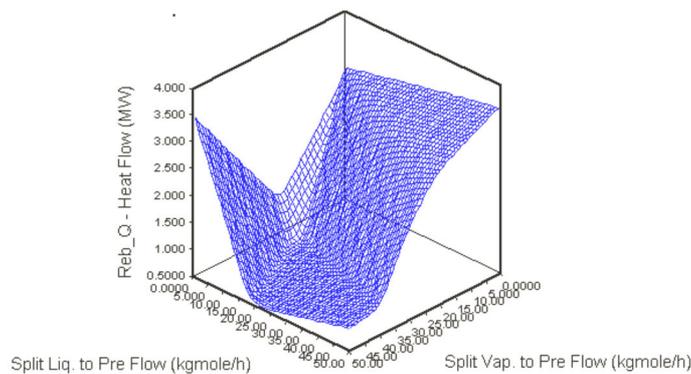


그림 4. DWC optimal heat flow distribution.

그림 4.에서 보면 liq & vap. Internal flow에 대한 에너지 소비 분포 곡선이 나타나는데 이는 앞에서 언급한 바와 같이 내부 순환 흐름에 따라 에너지 소비량이 차이가 많은 것을 알 수 있으므로 이 흐름이 DWC 최적화의 필수 설계변수 인 것을 알 수 있다. 그리고 shortcut sloppy 구조를 이용한 DWC 설계에 있어서 product specification을 만족하는 경우의 수는 많이 존재할 수 있으나 그림 2에서 보는 바와 같이 shortcut sloppy case에서 최소의 에너지를 소비하는 case가 결국 rigorous DWC case 및 rigorous DWC global case-study 설계에 있어서 최소 에너지를 소비하는 구조설계에 대응된다는 것을 알 수 있으므로 DWC 설계에 보다 효율적으로 접근할 수 있다.

### 결론

본 연구에서는 three conventional simple column's configuration을 이용하여 DWC의 보다 간편한 구조설계 방법을 제시하였고 제시된 방법의 타당성을 확인하기 위하여 rigorous sloppy case와 rigorous DWC case의 에너지 소비 패턴을 비교 분석한 결과 three conventional simple column's configuration의 최소에너지 소비를 가지는 구조설계가 DWC의 구조설계에도 유사하게 적용할 수 있음을 확인하여 제시된 방법의 타당성을 확인하였다. 또한 에너지 측면에서 2 TOP에 비해 이론상 30% 이상의 에너지 절감효과를 얻을 수 있으며 보다 효율적이고 간편한 방법임을 확인 할 수 있었다.

### REFERENCES

- [1] Salvador Hernandez, Arturo Jimenez, "Controllability Analysis of Thermally Coupled Distillation Systems", Ind. Eng. Chem. Res. 38, pp. 3957-3963, 1999.
- [2] R.Agrawal, "A Method to Draw Fully Thermally coupled Distillation Column Configurations for Multicomponent Distillation", Institution of Chemical Engineers Trans IChemE, Vol 78 Part A, April 2000.
- [3] Juan Luis Blancarate-Palacios, Maria Nancy Bautista-Valdes, Salvador Hernandez, Vicente Rico-Ramirez, and Jimenez, "Energy-Efficient Designs of Thermally Coupled Distillation Sequences for Four-Component Mixtures", Ind. Eng. Chem. Res. 42, pp. 5157-5164, 2004.