

환경친화적 발전을 위한 증류공정에서의 에너지 저감기술

영남대학교 디스플레이화학공학부 이문용

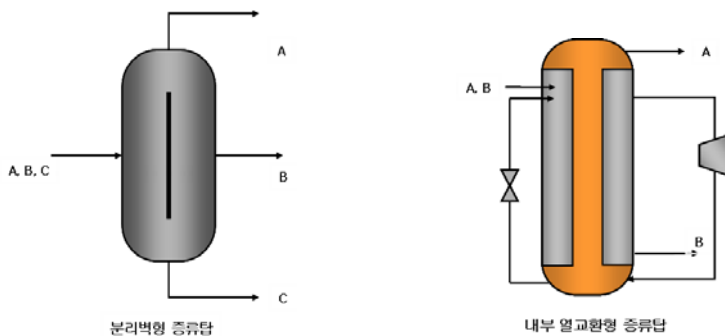
1. 서론

증류기술은 혼합물 성분 간의 상대휘발도 (또는 끓는점) 차이를 이용하여 원료혼합물의 특정 성분을 원하는 순도 수준으로 분리하는 기술로서 현존하는 분리기술 중 가장 널리 사용되고 있는 대표적인 분리기술이다. 동시에 우리나라 산업분야 에너지 총 소비량의 43%를 차지하고 있는 석유화학산업에서 소요되는 에너지 중 42% 정도가 증류공정에 의하여 소비되고 있는 만큼 에너지 다소비형 공정이기 때문에 화학산업의 환경친화적 발전을 위하여 그 어느 공정보다도 에너지 고효율화에 의한 이산화탄소 배출 저감이 절실히 요구되고 있는 공정이기도 하다.

환경친화적 전환을 위한 증류공정에서의 성능 향상과 에너지 저감기술 개발은 (1) 열결합형 신증류 기술 [분리벽형 증류탑, 내부열교환형 증류탑], (2) 흐름열 회수나 열펌프를 이용하는 외부적 열통합 구성, (3) 고급제어 및 최적화 기술의 적용, (4) 내부 단 또는 충전재 개선, (5) 반응 또는 다른 분리기술과의 통합[반응증류, 추출증류, 중력증류] (6) 다른 분리기술과의 혼합 구성[혼합형 증류] 등의 다양한 각도에서 이루어지고 있으며 본 고에서는 이러한 기술들의 동향과 비전을 살펴보고자 한다.

2. 증류공정에서의 에너지 저감기술 현황

○ 증류공정 구성 강화를 통한 열결합형 신증류 기술



분리벽형 증류탑(DWC: Divided Wall Column)과 내부열교환형 증류탑 (HIDiC:

Heat Integrated Distillation Column)의 두 가지 기술로 대표되고 있으며 몇몇 적용 분야에 대해서는 이미 막 상용화가 되었거나 상용화 직전의 단계에 이르고 있는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 30% (최대 60%) 정도의 에너지 절감이 가능하며 기존 증류탑의 40~50% 정도가 이들 구조로 대체될 수 있기 때문에 그 경제적 효과가 엄청난 것으로 기대되고 있다.

분리벽형 증류탑은 두 개의 증류탑을 분리벽을 이용하여 하나의 증류탑 안으로 통합한 구조이며 일반 증류탑 두개를 사용하였을 때 발생하게 되는 중간비점 성분의 재혼합에 의한 에너지 효율성 저하 문제를 근본적으로 제거해 주게 된다. 이 구조에 대한 아이디어는 1950년대부터 알려져 있었으나 이를 구현하는 기술적 한계와 운전상의 문제점 때문에 상용화가 지연되다가 최근에 와서 급속히 상용화되기 시작하였으며 차세대형 증류구조 중에서는 가장 앞서 구현된 기술이다. 소요공간이 작고 수율/순도의 향상 효과가 커서 신규 증류탑뿐만 아니라 기존 증류탑에 대한 revamp 에도 많이 시도 되고 있으며 분리 압력 차이와 유틸리티 온도 차이가 그리 크지 않다면 어떠한 삼성분계 이상의 분리에도 적용이 가능하기 때문에 기술의 적용범위가 매우 넓다. 특히 (1) 중간 비점 성분이 상대적으로 많은 경우, (2) 중간 비점 성분의 고순도 분리가 요구되는 경우, (3) 생산물 규격과 상대 휘발도 분포가 고른 경우에 뛰어난 성능 향상을 보이게 된다.

내부열교환형 증류탑은 증류탑의 정류(rectifying)부와 탈거(stripping)부를 압축기와 쓰로틀 밸브를 이용하여 분리하여 정류부를 탈거부보다 고온고압에서 운전하게 하는 이중탑(shell in shell) 형태의 구조를 가지며 정류부에서 탈거부로 연속적인 열교환이 일어나게 되므로 증류탑 전체가 열펌프의 역할을 하게 되어 최소의 에너지 소비를 구현하게 된다. 우수한 에너지 절감효과에 더하여 저급에너지로서 이용이 불가능했던 응축기 배열을 재이용이 가능한 고온수준으로 전환할 수 있어 이에 따른 부수적 배열 회수 효과도 매우 큰 것으로 알려져 있다. 분리효율 면에서도 정류부와 탈거부의 모든 지점에서 연속하여 응축기와 재비기가 설치된 이상적인 구조가 되기 때문에 일반 증류탑에서의 최소환류비(즉 무한단에서의 최소에너지 조건에 해당됨)보다 더 작은 환류비에서의 조업도 가능하다. 단, 최적 설계와 운전을

위해서는 기존의 증류탑에 적용되었던 방법과는 상당히 다른 새로운 접근방법이 필요하며 (내부 환류량이 응축과 증발에 의하여 각 단마다 변함) 정류부에서 탈거 부로의 열전달 효율을 최대로 하는 내부구조 설계, 내부열교환 구간에서의 전열특성 및 HETP의 예측, 운전 및 제어성능의 확보가 상용화를 위한 중요한 이슈이다.

○ 흐름열 회수나 열펌프를 이용한 외부적 열통합 구성

흐름열 회수에 의한 열통합은 에너지 회수를 위한 가장 고전적인 접근방법으로서 공정흐름 열이나 응축기(또는 재비기)의 열을 다른 증류탑의 재비기(또는 응축기)에 필요한 에너지나 원료흐름의 예열에 활용한다. 응축기 열 활용은 여러 개의 증류탑 군으로 공정이 이루어져 있는 경우에는 증류탑 운전압력을 적절히 설정해 줌으로써 용이하게 구현이 가능하며 중간 응축기나 재비기를 적절히 추가하는 방법도 널리 사용되고 있다(예 : 상압탑의 pumparound 추가).

열펌프에 의한 열통합은 탑정 응축기의 에너지를 압축기나 ejector 등의 열펌프를 이용하여 재비기의 에너지로 활용하는 구성으로서 증류탑 탑정과 탑저 부분 간의 온도차가 20~40°F 보다 크지 않고, 운전압력이 너무 낮지 않으며 운전온도가 너무 높지 않은 경우에 적용한다. pinch 기술과 공정모사기술이 요소기술이며 설비 투자비용과 운전성 저하가 이들 외부적 열통합 구성 기술 적용의 중요 장애요인이다.

○ 증류공정 고급제어 및 최적화 기술

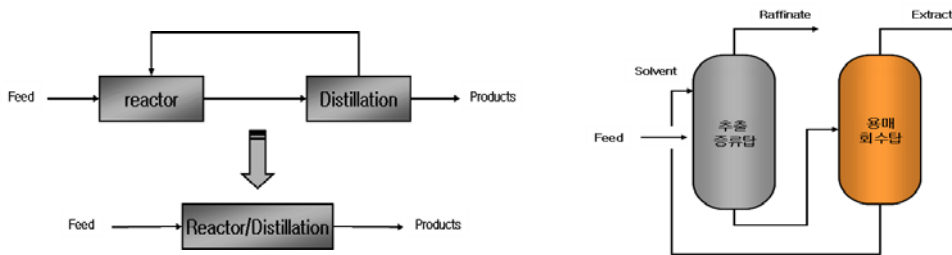
모델예측제어 등의 고급제어기법이나 최적화 기술을 이용하여 증류공정을 장치 한계치에 근접하거나 최적조건에서 운전하게 해줌으로써 주어진 하드웨어 하에서 운전과 제어만으로 용량과 성능을 극대화하는 접근방법이며 1980년 중반 이후 제어이론, 컴퓨터 기술과 통신기술의 발전과 더불어 현장 적용이 활발히 이루어져 왔으며 국내에도 많은 증류공정에서 이미 적용되어 좋은 결과를 얻고 있다. 현재까지 고급제어의 적용은 주로 설비의 개조없이 debottlenecking을 하는 목적으로 사용되어 왔으나 (원료량 증대 5%, 수율증가 10%) 이와 병행하여 평균 3% 정도의 에너지 절감효과가 보고되고 있다. 장치의 개조가 필요 없고 (혹은 최소한의 개조로) 거의 모든 증류공정에 적용 될 수 있다는 강점이 있어 증류공정의 성

능중대나 에너지 절감을 위하여 가장 많이 적용되고 있는 기술이지만 설치 후에 시스템의 성능을 유지하기 위하여 정기적인 유지보수가 필요하며 이를 전담하기 위한 고급인력이 필요하다는 것이 장애요소이다. 공정의 동적모델을 빠르고 안전하게 구해주는 공정인식 기술, 모델을 기반으로 최적의 제어동작을 내어주는 모델 예측제어기술, 측정이 용이한 운전변수들로부터 생산물 spec 과 운전상태를 추정해주는 soft sensor 기술, real-time 정상상태 모델 구축 기술, 최적화 기술 등이 핵심 요소기술이다.

○ 내부 단 및 충전재 기술

분리단과 충전재는 증류탑에서 성분 분리를 위한 물질전달이 실제로 일어나는 장소로서 증류탑의 분리성능을 결정짓는 가장 중요한 인자 중의 하나이다. 새로운 분리단이나 충전재로의 교체는 주로 생산량 증대를 일차적인 목적으로 하고 있으나 이는 동일한 생산량에서는 환류량 및 재비량의 감소를 가져오므로 에너지 절감 효과도 얻을 수 있게 된다. downcomer 및 perforation 구조 설계, distributor 설계, 충전재 구조 및 재질, CFD 기반 유체 거동예측 등이 고효율 단 및 충전재 개발을 위한 핵심 기술이다.

○ 반응 또는 다른 분리기술과의 내부적 결합



반응증류는 한개의 증류탑 내에 반응과 증류를 동시에 수행하는 방법으로서 화학 반응에서의 평형에 의한 전환율 한계를 극복함과 동시에 통상적인 증류공정에서 발생하는 공비혼합물 형성을 피할 수 있는 효율적인 방법이다. 이 기술의 적용을 위해서는 반응과 분리가 발생하는 온도영역이 겹쳐져야 하며 가역반응이 포함되어야 한다. 1920년대 균일계 촉매에 의한 에스테르화 반응에 최초로 제시되었지만 공정 해석과 적용상의 어려움과 설계기술의 미확보로 1980년대에 이르러서야

MTBE 생산분리 공정에 최초로 공업화되었다. 반응증류는 (1) 반응열을 효과적으로 이용할 수 있어 분리를 위한 에너지를 대폭 줄일 수 있으며 (2) 전환율 향상과 함께 선택도가 높아져 고순도 제품을 얻을 수 있고 (3) 공정의 단순화에 의해 제어성과 조작성이 향상되고 (4) 장치비 및 운전비를 현저히 줄일 수 있다는 장점이 있다. 한편, (1) 기술의 적용범위가 한정되어 있고 (2) 특성 해석이나 모델링이 어려워 실험에의 의존성이 크고 (3) scale-up과 장치 설계가 어려우며 (4) 개발비용이 많이 소요되는 점이 주요 장애요인으로 작용하고 있다. 주 적용 분야는 에스테르화 반응, 비닐아세테이트 합성 반응, 트랜스 에스테르화 반응, 가수분해 반응, 수화/탈수화 반응 등의 생산 분리이다.

추출증류는 끓는점 차이가 매우 작거나 공비점을 형성하여 분리가 불가능한 성분들을 분리시키기 위하여 혼합물 중의 특정 성분들과 친화력이 강한 고비점의 용매를 첨가하여 증류하는 기술로서 2차대전 중 고순도 톨루엔과 부타디엔을 생산하는 공정에 처음으로 적용되었으며 방향족 화합물 분리, 알코올 분리, 올레핀/파라핀 분리, 나프텐/파라핀 분리, 카르복실산 분리, 스티렌/방향족 분리, 다이올레핀 분리 등으로 적용분야가 확장 되고 있다. (1) 운전방식이 일반 증류공정과 차이가 없으며 (2) 혼합물의 끓는점 차이와 극성도를 동시에 이용함으로써 분리 생산물의 순도와 수율을 보다 유연하게 관리할 수 있으며 (3) 생산물 속의 미량 잔류 용매 문제가 없고 (4) 일반 증류공정을 비교적 간단히 개조함으로써 구현 가능하다는 장점을 가지고 있으며 (1) 분리하고자 하는 특정성분과 선택적인 친화력을 가지면서도 (2) 고비점 성분보다 충분히 낮은 휘발도를 가지고 (3) 증류조건에서 열적 안정성과 내식성, 저독성을 가지며 (4) 원료혼합물과의 용해성이 좋고 (5) 적절한 가격을 가지는 용매를 찾거나 개발하는 것이 상용적 적용을 위한 핵심이다.

○ 혼성형(hybrid) 증류기술 : 타 분리기술과의 혼합 구성

증류 전/후처리 단계에 예비/마무리 분리를 위하여 적절한 타 분리기술(막, 흡착, 추출, 결정화, 흡수)을 도입하여 하나의 시스템을 이루도록 함으로써 증류공정의 전체적인 효율 향상과 용량 증가 효과를 도모하는 방법으로서 예를 들면 증류공정에서 일차 분리되어 나온 생산물의 최종 마무리 분리를 타 분리 기술을 이용하

는 이차공정을 통하여 수행함으로써 증류탑의 환류량을 대폭적으로 줄이고 용량을 늘리는 것이 있다. 증류기술을 다른 분리기술로 완전히 대체하는 접근방식에 비하여 기술적으로 보다 용이하고 경제성이 높으며 특히 고에너지 소비형 증류 분야에 응용 잠재성이 크다(예: 현재의 분리막 기술로는 고순도 분리를 달성하기 어려우나 증류공정의 전처리 단계로 활용함으로써 전체적 에너지 효율을 향상). 또한 이러한 혼성형 증류시스템은 에너지 소모량 감소 효과 뿐 만 아니라 설비 투자비용의 감소 효과도 기대할 수 있다. 혼성형 증류시스템의 경제성을 극대화해 주는 새로운 장치의 설계/개발, 시스템의 특성과 경제성을 사전에 평가할 수 있는 도구, 실증을 위한 엔지니어링 규모의 파일럿 시험이 중요하며 비이상계 상평형 예측 방법, 용매 선정 도구, 공용성 DB 구축이 필요하다. 흡착, 추출, 분리막 혼성형 시스템에 의한 에너지 절감 잠재 효과에 비하여 흡수, 결정화 혼성형 시스템은 잠재효과나 적용범위가 작다.



3. 결론

우리나라는 에틸렌 생산과 원유 정제능력 세계 5위로서 석유화학산업이 국가 에너지 소비와 산업부문 에너지 소비에서 차지하는 비중이 매우 큰 산업구조이다. 이러한 석유화학산업의 지속가능한 발전을 위하여 정부에서는 투입에너지 30% 절감과 이산화탄소 배출 30% 축소를 2020년 지속가능한 화학산업의 목표로 설정한 바 있으며, 지속가능한 에너지이용 체계 확립과 기후변화 협약 대응을 위하여 에너지 절약/고효율 기술 개발과 온실가스 감축기술 개발에 총력을 기울이고 있는 상황이다. 증류공정은 우리나라 산업 부문 에너지 총소비의 19%와 국가 에너지 총 소비의 11%를 소요하고 있으며 이는 에너지 사용량 1,670만TOE과 CO₂ 배출량 1,460만TC(중유기준)에 해당하는 막대한 양이다. 따라서 화학산업의 지속가능한 발전과 환경친화적 전환을 위하여는 증류공정의 고효율화와 에너지 저감기술 개발이 보다 활발히 이루어 져야 할 것이다.