

에너지 절감을 위한 신증류 기술

영남대학교 디스플레이화학공학부 이문용

1. 서론

증류기술이란 혼합물 성분 간의 상대휘발도 (또는 끓는점) 차이를 이용하여 원료혼합물의 특정 분을 원하는 순도 수준으로 분리하는 기술이다. 산업적 증류는 원통형 shell 내부에 1 단 이상의 분리단 (또는 이에 해당하는 충전재)로 구성된 증류탑에 의하여 수행된다. 분리에 필요한 매개체로 열이 사용되며 탑 내부의 환류량 유지를 위하여 탑정 생산물 중의 일정부분이 탑 내부로 환류되는 형태를 가진다. 증류기술은 국가 에너지 소비에서 차지하는 비중이 절대적인 대표적인 분리기술임. 우리나라 산업분야 에너지 총 소비량의 43%를 차지하고 있는 석유화학산업 (정유, 석유화학, 정밀화학)에서 분리공정에 소요되는 에너지 비중은 50%에 이르고 있으며, 분리공정 에너지 중 85 % 정도가 증류공정에 의하여 소비되고 있다.

증류는 현존하는 분리기술 중 가장 널리 사용되고 있는 대표적인 분리기술로서 (1) 상대휘발도가 1.3보다 크고 (2) 생산물이 증류 조건에서 열적으로 안정하며 (3) 생산량이 5,000-10,000 lb/day 이상이고 (4) 증류 분위기에서 폭발이나 심각한 부식이 발생하지 않는 경우에 적합하다. 증류기술은 (1) 공정 구조가 단순하고 유연하며, (2) 투자비용이 저렴하고(장치 용량의 0.6 승에 비례), (3) 운전이 용이하고, (4) 운전 위험도가 작다는 장점이 있으며 이는 상용화에 매우 중요한 강점으로 작용하고 있다. 규모가 될수록 그 경제성이 커지므로 산업체에서의 대규모 분리에 특히 유리하다 (탑 자체와 내부 장비가 전체시스템 비용에 기여하는 정도가 펌프, 밸브, 제어시스템 등의 외부 장비에 의한 비용에 비해 상대적으로 작음. 예: 12인치 직경의 증류공정의 투자비용은 6인치 탑에 드는 비용에 비해 20-25% 정도밖에 비싸지 않음). 에너지만을 분리매개체로 사용하기 때문에 타 분리기술과 달리 분리막, 흡착제, 용매 등과 같은 별도의 분리 매개체가 필요하지 않다.

기술이 가지는 오랜 역사로 인하여 (1) 풍부한 기액 상평형 데이터가 축적되어 있고 (2) 관련된 물리·화학적 특성이 비교적 잘 알려져 있기 때문에 (3) 분리 특성을 설계 단계에서 정확하게 예측할 수 있고 (4) 공정 및 장치의 정교한 설계와 분석이 용이하며 (5) 장치의 제어와 운전과 관련된 경험이 풍부하게 축적되어 있다는 장점이 있다. 단점으로는 (1) 에너지 소모가 크고 (2) 에너지 효율성이 낮으며 (3) 공비점을 형성하거나 끓는점이 겹쳐지는 혼합물은 분리할 수 없고 (4) 열적으로 민감한 혼합물은 증류 중에 변질될 수 있다는 점이다 (예: 물과 같은 대량의 매개체 속에 섞인 소량의 고비점 성분을 분리하는 경우에는 적합하지 않음).

대표적 분리기술로서의 증류기술의 위상 (다른 분리기술에 의한 부분적인 대체는 이루어질지라도)은 앞으로도 계속될 것으로 전망되고 있다. 증류기술의 적용 범위는 매우 광범위하여 적절한 상대휘발도 차이를 가지는 혼합물의 분리와 관련된 거의 모든 분야에 적용되고 있다 (원유 및 석유화학물질의 분리에서 공기로부터 질소와 산소의 cryogenic 분리까지; 바닷물로부터의 식수의 대량 분리생산에서 우주 조종사의 오줌으로부터 물을 회수하는 분야까지 이르고 있음). 석유화학산업의 경우, 사용되는 모든 분리 수단 중 90~95%를 증류기술이 차지하고 있다.

이러한 증류공정에서의 성능 향상과 에너지 저감을 위하여 최근 신증류기술을 이용한 접근이 활발히 시도되고 있다.

2. 증류공정 구성 강화를 통한 열결합형 신증류 기술

열결합형 증류공정은 분리벽형 증류탑(DWC: Divided Wall Column)과 내부열교환형 증류탑(HIDiC: Heat Integrated Distillation Column)의 두 가지 기술로 대표된다. 그림 1에 두가지 열결합형 증류공정의 개략도를 나타내었다.

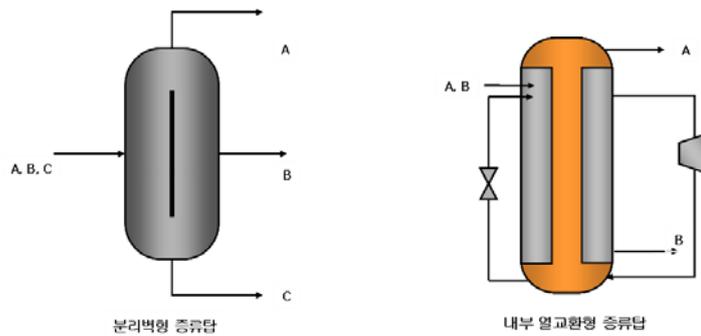


그림 1. 두가지 열결합형 증류공정의 개략도

이들 기술은 선진국에서 차세대형 증류공정으로 집중적으로 개발하고 있으며 몇몇 적용분야에 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 증류탑** : 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 준다. 구조에 대한 아이디어는 1950년대부터 알려져 있었으나 이를 구현하는 기술적 한계와 운전상의 문제점 때문에 상용화가 지연되다가 최근에 와서 급속히 상용화되기 시작하였음. 차세대형 구조 중에서는 가장 앞서 구현된 기술이다. 일반적으로 30% 정도의 에너지 절감효과(최고 60%)와 20~30% 정도의 투자비용 절감효과가 있는 것으로 알려져 있다. 소요공간이 작고 수율/순도의 향상 효과가 커서 신규 증류탑뿐만 아니라 기존 증류탑에 대한 revamp 에도 많이 시도 되고 있다. 분리 압력 차이와 유틸리티 온도 차이가 그리 크지 않다면 어떠한 삼성분계 이상의 분리에도 적용이 가능하기 때문에 기술의 적용범위가 매우 넓다. (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 보인다. 예비 증류부와 주 증류부를 분리하는 분리벽 구간의 내부구조 설계, 분리벽 구간에서의 전열특성 및 HETP의 예측, 분리특성 예측을 위한 전산모사 기술, 운전 및 제어성능의 확보 등이 중요한 기술적 이슈이다.

- **내부열교환형 증류탑** : 증류탑의 정류(rectifying)부와 탈거(stripping)부를 압축기와 쓰로틀 밸브를 이용하여 분리하여 정류부를 탈거부보다 고온고압에서 운전하게 하는 이중탑 (shell in shell) 형태의 구조이다. 정류부에서 탈거부로 연속적인 열교환이 일어나게 되므로 증류탑 전체가 열펌프의 역할을 하게 되어 최소의 에너지 소비를 구현하게 된다. 일반적으로 약 30~40% 정도의

에너지 절감효과(최고 60%)가 있는 것으로 알려져 있으며 저급에너지로서 이용이 불가능했던 응축기 배열을 재이용이 가능한 고온수준으로 전환할 수 있어 이에 따른 부수적 배열 회수 효과도 크다. 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 가능하게 해준다. 최적 설계와 운전 을 위해서는 기존의 증류탑에 적용되었던 방법과는 상당히 다른 새로운 접근방법이 필요하다 (내부 환류량이 응축과 증발에 의하여 각 단마다 변함). 정류부에서 탈거부로의 열전달 효율을 최대로 하는 내부 구조 설계, 내부열교환 구간에서의 전열특성 및 HETP의 예측, 운전 및 제어성능의 확보가 상용화를 위한 중요한 이슈이다. 온도차이가 그리 크지 않은 탈거부와 증류부로 이루어진 증류탑 대부분이 적용대상이 될 수 있기 때문에 그 적용범위가 매우 광범위하여 상용화시에 경제적 효과가 매우 큰 차세대형 증류탑 구조로 주목받고 있다.

3. 신증류기술 개발 추진의 필요성

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%의 에너지를 소요하고 있음. 이는 에너지 사용량 1,670만TOE과 CO₂ 배출량 1,460만TC(중유기준)에 해당하는 막대한 양이다 (근거: 국가 에너지 총 소비량(2003년 기준: 16.4×10^7 TOE)의 24%를 석유화학산업에서 소요; 석유화학산업 에너지 총 소비의 50%가 분리공정에 의함; 분리공정 에너지 총 소비의 약 85%가 증류공정에 의함).

미국의 경우에도 국가 에너지 총 소비량의 5.4%를, 영국의 경우 산업에너지 총 소요량의 13%를 소요하고 있는 대표적 에너지 다소비 공정이다. 또한 석유화학산업에서의 에너지 비용은 매출액 대비 약 7% 로서 해당 산업 평균 수익률인 2~4%를 크게 상회하여 에너지 비용이 기업 경영에 상당한 영향을 미치고 있다.

이와 같은 막대한 에너지 절감 잠재성과 필요성에도 불구하고 (1) 해당 산업체가 가지는 보수적 특성, (2) 높은 설비 투자비용, (3) 막대한 개발비용 및 기간, (4) 긴 내구연한 등의 이유로 기술개발 장벽이 높고 신규 공정의 대체나 신기술 적용이 타 분야에 비하여 매우 어려운 실정이다. 따라서 기 설치된 장치의 운전 최적화나 에너지 절약형 외국기술의 도입에는 관 심도가 높지만 기존 설비를 대체하는 신기술을 업계 자체에서 개발하여 상업화하는 데에는 관심이 낮은 실정이다.

증류와 관련하여 에너지 절약만을 위한 기술이 산업체에서 타당성을 가질 조건은 매우 tight 하여 6~12개월 이내의 투자회수 기간을 요구하고 있다(생산량 증대를 위한 기술의 경우 12~18개월). 따라서 증류와 관련된 이러한 장애요인들을 극복하고 증류관련 에너지 절감 신기술의 개발과 적용을 활성화하기 위해서는 기술 개발에 대한 정부의 적극적이고도 차별화된 지원과 시범 적용 회사에 대한 강력한 incentive 제공이 절실히 필요하다. 기술 개발이 이루어질 경우, 적용될 수 있는 시장은 매우 큼. 국내의 경우 3,000여기의 증류탑이 조업 중에 있으며(전체 장치비의

70%가 분리공정에서 소요됨), 미국은 40,000여기 (설비 투자비용으로만 연간 80억\$ 이상 소요), 일본은 3,500여기가 조업 중에 있다. 특히 국내의 경우, 향후 2 ~ 3년간 NCC, FCC 등의 공장 증산 및 신규 증설이 계획 되어 있고 1970~1980년대에 대규모로 건설된 증류탑 (평균 내구연한 25~30년)들의 신규 대체 수요 발생이 예상되고 있다.

세계적으로도 BRICS 국가의 경제성장과 더불어 석유화학산업에서의 증설이 활발히 이루어 질 것으로 전망되고 있는데 중동 산유국의 경우 막대한 원유 판매 이익을 바탕으로 자국 내 정유 정제 및 석유화학 공장의 대규모 신설을 계획 하고 있으며 그 투자 규모가 1000 ~ 2000 억\$ 정도로 추산 하고 있다. 또한 증류기술은 석유화학산업 이외에도 최근 급성장하고 있는 반도체 및 디스플레이 소재산업과 생물산업, 의약품, 식품산업에서 분리정제를 위한 중요한 수단으로 그 사용범위가 확장되고 있으며 수처리/대기처리 등의 환경분야에서도 중요한 분리수단으로 자리잡고 있기 때문에 향후의 시장 규모나 타 산업으로의 파급효과도 매우 크다.

이와 같이 국가 에너지 소비와 CO₂ 배출에 차지하는 비중이 막대하여 기술 개발 시 국가 에너지 절감과 CO₂ 저감에의 기여효과가 엄청나며 (기존 대비 1% 만 절감 시 연간 17만 TOE 에너지 절감 효과, 15만 TC CO₂ 저감 효과) 에너지 절약 잠재성이 매우 크고 시장규모와 파급효과도 막대한 기술이기 때문에 에너지 절약 및 고효율 기술 개발에 대한 지원과 노력이 그 어느 분야보다도 우선적으로 필요하다.

4. 국내의 기술개발 동향 및 기술수준

국내에서 증류공정은 1960년대 석유화학산업 태동과 더불어 급속히 확산되어 왔으나 거의 모든 공정이 외국 기술의 도입으로 이루어졌으며 많은 기본적인 공정 특허는 대부분 외국회사 소유이다. 증류공정의 성능향상이나 용량 증대를 위한 부분적인 개선은 자체적으로 활발히 이루어지고 있으나 핵심 부품이나 기술은 대부분 선진국에서 도입하고 있다. 현재 일부 기본적인 증류공정에 대하여는 자체적인 기본설계와 건설이 가능한 상황이며, 삼성 엔지니어링 과 SK 건설 등의 몇몇 국내 엔지니어링사들은 증류공정에 대한 기본설계 능력을 보유하고 있으나 시공 시에는 책임소재 등의 이유로 자체 설계보다는 외국 licenser의 시방을 도입 적용하는 상황이다. 운전기술은 선진국 최고수준으로 동남아나 중남미에 기술 수출을 하고 있다.

전체적으로 증류기술 개발과 관련하여 (1) 많은 연구개발 투자비가 소요되며, (2) 그동안 석유화학업체들의 과당 경쟁과 (3) 석유화학산업의 특수성으로 인해 관련 업체들의 투자가 아직까지 활발히 이루어지고 있지 않다. 1980년대 들어 기존의 증류공정을 부분적으로 개선함으로써 이미 많은 경제적 효과를 얻고 있다(지난 20년간 정유산업에서의 에너지 원단위 30% 감소). 분리벽형 증류와 내부열교환형 증류와 같은 신증류 기술의 경우, 일부 대학교에서 기본연구가 수행되고 있는 수준이며 일부 산업체에서 기술개발에 대한 관심은 많으나 아직 본격적인 연구는 없는 상황임.

- **분리벽형 증류 기술** : 영국 UMIST 대학과 MW Kellog, BP, BASF, Linde, Sasol, JGC, Kyowa, Smitomo 등의 선진 석유화학 및 엔지니어링 회사가 중심이 되어 1980년대 중반부터 상용화 연구가 본격적으로 진행되고 있다. FCC 공정의 debutanizer, High purity ethyl acetate 분리, NGL 공정의 iso-butane/ n-butane/gasoline 분리, LPG 분리, Reformate 분리, BTX 분리, PX 공정의 aromatic 분리, solvent 분리 등 광범위한 분야에 대하여 적용 연구 중이다.

- 내부열교환형 증류기술 : 현재 일본이 주도적으로 개발하고 있으며 Kansai University, Kimura Chemical Plants Co., Maruzen Petrol Chemical Co., National Institute of Material & Chemical Research, Kansai Chemical Engineering 등이 NEDO 주관하에 new-sunshine 계획의 일환으로 산학연 컨소시움을 형성하여 실증형 파일럿이 가동 중에 있으며 상용화 전단계로 보고된다. 유럽의 경우, 네델란드의 Delft 대학 연구팀이 plate fin 과 concentric 의 두가지 type 에 대하여 bench 급의 장치를 시험 운영 중에 있다. Reformat 분리, benzene/toluene 분리, 각종 aromatic 분리, propylene/propane 분리에 대한 적용연구 진행 중이다.

5. 선진국 기술보급현황

- 분리벽형 증류탑 : 2003년 현재 전 세계적으로 약 60 여기의 상용규모 분리벽형 증류탑이 조업 중이다. BASF 사는 분리벽형 증류탑을 가장 많이 운영하고 있는 회사이며 Ruhr 정유공장의 방향족 회수탑의 revamp에 세계 최초로 적용한 것을 시작으로 하여 현재는 자체로만 30 여기의 분리벽탑이 가동 중에 있다. MW Kellogg, BP, JGC 는 파트너쉽을 구성하여 자체 license를 보유하고 있으며 1999 년에 BP의 Coryton 정유공장의 기존 reformat 분리탑의 revamp 에 적용되어 30% 이상의 에너지 절감과 2배의 용량 증대와 50% 이상의 수율 증대 결과를 얻은 것으로 보고되었다. Linde 엔지니어링사는 남아프리카의 Secunda 공장에 있는 Sasol 사의 1-octene 분리 공정에 높이 107m, 직경 5m 에 이르는 초대형 분리벽형 증류탑을 건설하였다. Krupp Uhde사는 열분해 가솔린으로부터 벤젠을 분리제거하는 분리벽탑을 제조하여 Veba Oel사에 설치, 조업중에 있으며 Chevron 사에도 설치 예정이다. Sumitomo 엔지니어링사는 Kyowa 사와 공동으로 자체의 license를 개발하여 Kyowa Yuka 의 16,500mt/yr 에틸아세테이트 공장에 상용화하였으며 현재 까지 최소 6기 이상의 상용탑을 설계, 발주하고 있다.

- 내부열교환형 증류기술 : 일본이 주도적 위치에 있으며 NEDO 주관하에 New-sunshine 계획의 일환으로 산학연 컨소시움을 형성하여 연구하고 있으며, 현재 상용화 직전단계로 실증형 파일럿이 가동 중에 있다. 신증류공정에서의 에너지 절감 기술 특허 추이는 아래 그림 2와 같다. (미국)

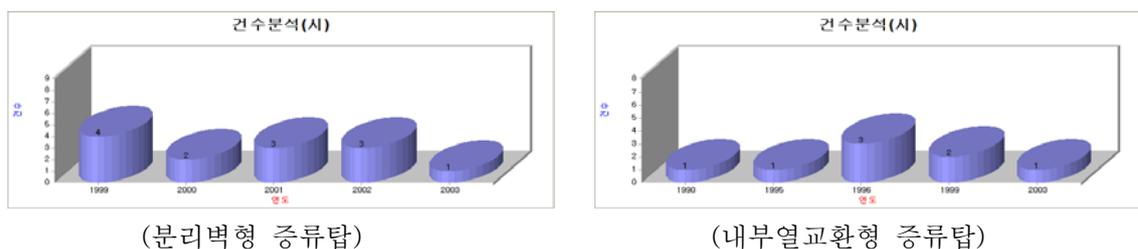


그림 2. 신증류공정에서의 에너지 절감 기술 특허 추이 (미국)

6. 결론

증류공정이 산업 에너지 및 국가 에너지 소비에 차지하는 비중은 막대하며 이러한 비중은 향후에도 큰 변동이 없을 것으로 전망되고 있다. 따라서 증류공정이 가진 에너지 절약 잠재성과 기

기술개발 시의 국가에너지 경제에의 파급효과를 고려할 때 증류공정의 에너지 저감 및 고효율화 기술개발에 집중적인 투자가 시급한 실정이다. 특히 기술개발 고위험성과 증류공정이 운영되고 있는 석유화학산업체의 보수적 특성을 감안할 때 차별화된 정부주도 신기술 개발 정책과 시범 적용사에 대한 강력한 인센티브가 그 어느 분야보다도 절실히 요구되고 있다. 개발 기술의 에너지 저감 효과와 보급 범위, 상용화 가능시기 등을 종합적으로 고려할 때 차세대형 고효율 증류기술인 “분리벽형 증류탑”과 “내부열교환형 증류탑”기술 개발이 우선적으로 요망된다. 특히 분리벽형 증류탑과 같은 차세대형 고효율 증류공정 분야는 현 국내 기술 수준으로 비교적 단기간 내에 구현이 가능하면서도 성공 시의 경제적 효과가 매우 크기 때문에 정부 차원에서의 적절한 기술개발 지원과 적용 유도가 이루어진다면 성공 가능성이 큰 것으로 판단된다.