

열복합 증류탑의 개요와 응용

김영한
동아대학교

1. 열복합 증류탑의 개요

통상의 3성분 혼합물의 증류는 그림 1과 같이 2기의 증류탑을 사용하여 3 가지 제품을 생산하는 것이 기본이다. 그러나 이와 같은 증류방식을 사용하면 증류탑 내 액의 조성분포가 고효율의 평형증류의 조성분포와는 많은 차이를 보이며 이는 증류탑 효율을 저하시키는 요인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 고안된 것이 그림 2의 열복합 증류방식이다. 이 방식은 전처리탑을 이용하여 원료인 3 성분 혼합물을 2 가지의 2 성분 혼합물로 1 차 분리하고 이를 다시 주탑에서 분리하는 증류방식으로 증류탑 내의 액의 조성분포가 평형증류의 조성분포와 유사한 구조로 되어 증류탑 효율을 극대화 시킬 수 있고 이를 통하여 증류공정에서 사용하는 에너지의 사용량을 절감할 수 있다. 그림 3의 구조는 그림 2의 열복합 증류탑을 실제 상용화하면서 현장에서 응용이 가능한 형태로 변형시킨 분리벽형 증류탑이며 이론적인 해석은 그림 2의 구조와 동일하게 할 수 있다.

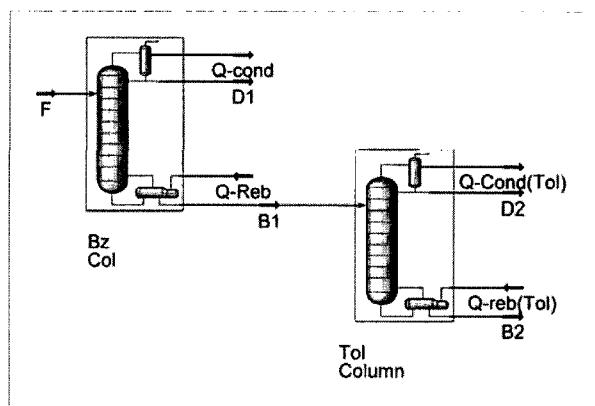


그림 1. 통상의 2 탑 증류시스템

2. 열 복합 증류탑의 연구

지구 온난화 문제의 해결 방안으로 이산화탄소 배출량 저감

을 위한 여러 가지 방안이 연구되고 있다. 이에 부합하여 화학공정 중 에너지 소비가 많은 증류공정의 에너지 사용량 절감을 위한 고효율 증류공정의 개발과 응용을 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 제조업 중에서 석유 및 화학 공정에서 사용하는 에너지의 비율이 49 %를 차지하고 그 중 40 %를 증류공정에서 사용[1]하기 때문에 고효율 증류공정의 개

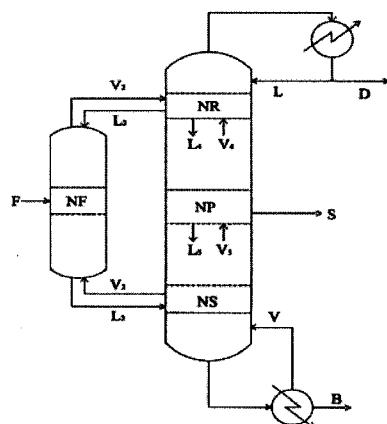


그림 2. 열복합형 증류탑

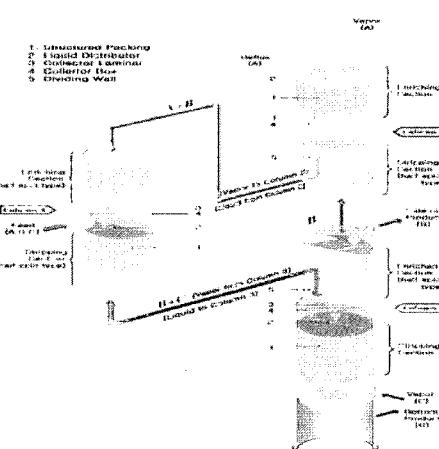


그림 3. 분리벽형 증류탑

발은 매우 중요하며 시급한 과제이다. 여러 가지 고효율 증류탑 중 열복합 증류탑의 실제 활용이 가장 활발하고 또 많은 연구가 진행되고 있으나 국내의 경우 아직 활용이 되지 않고 있다.

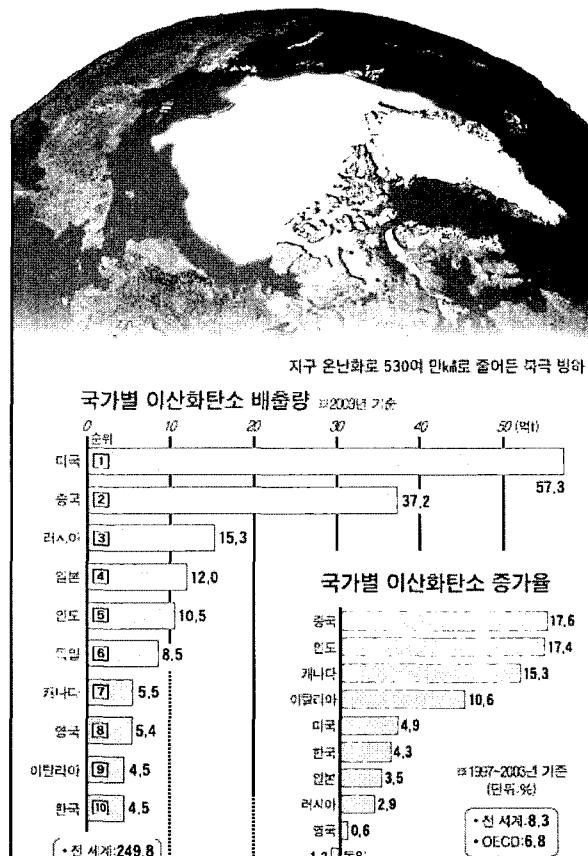
열복합형 증류탑에 관한 연구는 주로 유럽을 중심으로 많이 연구되어 왔다. 특히 유럽연합(EU)의 에너지절약 연구지원을 받은 맨체스터 공과대학의 Smith 교수팀이 많은 연구[2,3]를 발표하였다. 미국의 경우는 에너지 절약에 관해 유럽이나 일본에 비해 다소 관심이 낮아 연구가 활발하지 못하였다. 열복합 증류탑에 관한 연구는 주로 최소 환류량을 계산하여 탑을 설계하는데 활용하려는 연구가 많았으며 탑의 구조적 설계에 관한 연구는 3-column 모델(주탑을 두 개로 분리하고 전처리탑을 포함하여 3기의 탑으로 구성)을 이용한 Smith 교수팀의 연구가 처음[2]이었고 이를 개선한 설계방법을 다시 발표하였다[3]. 3-column 모델법에서는 열복합 증류탑의 전처리 탑과 주탑의 연결흐름의 조성을 일치시키기 위하여 많은 반복계산이 필요한 문제가 있는데 반해 다성분 평형증류곡선을 이용한 구조적 설계방법이 제안되었다. 이러한 구조적 설계방법을 3성분 증류에 활용한 연구[4]와 4성분 증류에 활용한 연구[5]가 추가적으로 발표되었다.

외국에서 열복합 증류탑의 연구와 응용이 활발한데 반해 우리나라에서 큰 관심을 보이지 않는 주된 이유는 실험적 연구결과가 없어 현장 기술자들의 신뢰를 확보하지 못하고 있기 때문이다. 특히 열복합 증류탑의 운전성이 열악함은 이미 업계에 많이 알려져 있기 때문에 운전성을 개선할 수 있는 방안을 제시하고 이를 실험적으로 입증하여야 국내에서 실용화가 가능하다. 기존의 연구는 국내외를 막론하고 열복합 증류탑의 설계에만 치중하여 운전성의 개선에 대한 방안을 아직 제시하지 못하고 있다. 또 기존의 연구는 시뮬레이션에 의존하여 왔기 때문에 현장기술자의 신뢰를 확보하는데 문제가 있다. 열복합 증류탑에 관한 연구는 증류탑의 설계방법에 관한 연구와 운전성 향상을 위한 제어방법의 개발을 위한 연구로 구분되며 설계방법은 증류탑의 구조해석에 의한 설계법과 증류탑의 제작비용을 최소화하는 최적화 계산에 의한 방법이 연구되고 있다. 최적화 계산에 의한 방법은 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있고 새로운 구조의 열복합 증류탑을 개발하기 위한 자료를 제공할 수 없는 단점을 가지고 있다.

3. 열복합 증류탑의 필요성

열복합 증류탑을 통한 증류공정의 에너지 사용절감은 현재

지구 온난화와 관련하여 국제적인 주목을 받고 있는 이산화탄소 배출량 저감과 밀접한 관계를 갖고 있다. 과다한 온실가스의 배출에 의한 급격한 지구온난화의 영향으로 여러 가지 문제가 발생하고 있음을 잘 알고 있는 사실이다. 이러한 지구온난화를 일으키는 온실가스는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 프레온, 오존 등이 있으며 이산화탄소는 인위적으로 배출되는 전체 온실가스의 약 60%를 차지한다. 이를 해결하기 위하여 그동안 여러 차례 지구환경개선을 위한 국제회의가 열렸었고 그 결실로 이루어진 교토 의정서(2005년 2월 16일부터 발효)에 의하면 우리나라는 2013년부터 화석연료의 사용을 약 15% 줄여야 할 것으로 예상된다. 특히 우리나라는 온실가스 배출량이 세계 10위(2003년 기준, 그림 4 참조)인데다 1990년의 2배로 늘어(그림 5 참조) 국제사회의 압력이



기후 변화와 교토의정서 일지

- 1988년 '기후변화에 관한 정부간 패널' (IPCC) 발족
- 1992년 유엔기후변화협약(UNFCCC), 온실가스 자발적 감축 결의
- 1997년 12월 12일 UNFCCC 가입 159개국
교토의정서 서명, 신전국 2005-2012년
온실가스 5.2% 감축(1990년 대비)
- 2001년 3월 미국·호주 교토의정서 탑재
무서 미 대통령 "의정서는 끔찍하고 미국 경제에 비용 부دان 끈다"
- 2004년 11월 러시아 교토의정서 서명
- 2005년 2월 교토의정서 공식 발효

그림 4. 각국의 온실가스 배출량

가중될 것이라는 우려가 많다.

현재 우리나라 정부와 산업계가 온실가스를 줄이기 위한 특단의 대책 마련에 착수했지만 산업 구조 자체가 바뀌어야 하는 데다 비용부담도 많아 적잖은 어려움을 겪을 것으로 예상된다. 현대경제연구원에 따르면 한국이 온실가스 배출량을 10% 줄여야 할 경우 2020년에는 최소 2조9468억원에서 최대 28조6323억원의 비용이 발생할 것으로 예상되며 이는 한국 국내총생산(GDP 2003년 기준)의 0.4% 내지 4.4%의 수준에 이를 만큼 경제 전체에 큰 부담이 된다. 이에 따라 국내 이산화탄소 배출권 시장의 조기 확립, 온실가스 삭감 기금 마련 등 국가 차원의 대응책 마련이 시급하다. 우리나라 정부도 기후변화협약이 국제적 대세인 만큼 이에 적극 대응하는 한편 피해를 최소화하는 수준에서 친환경산업 육성에 주도적으로 나서기 위해 기후변화협약 이행 기반 구축, 부문별 온실가스 감축사업, 기후변화적응 기반 구축 등 3대 분야에서 90개 과제를 선정하고 총 21조4807억 원을 투입할 계획이다[6].

증류공정에서의 에너지절감을 위하여 기존의 공정에 최신의 제어기법을 도입하거나 최적화의 기법을 활용하여 실제로 약 5% 내지 10%의 에너지 절감효과를 얻을 수 있고 많은 공장에서 이러한 방법으로 에너지를 절감하고 있는 것이 현실이다. 그러나 공정자체를 개선하여 에너지를 절감한다면 그 절감효과는 최신의 제어기법이나 최적화의 활용에 의한 절감효과와는 비교도 할 수 없을 정도로 큰 에너지절감 효과를 얻을 수 있다. 열복합형 증류탑의 경우 약 30%의 에너지 절감효과를 가져올 수 있으며, 국내 석유화학회사를 대상으로 조사한 바에 따르면, 국내의 BTX 분리공정에서만 열복합 증류탑을 사용했을 때, 하루에 약 12,700달러(연간 42억원, 17,000 toe)의 에너지 비용절감 효과가 있으며(우리나라 전체의 BTX 공정을 대상으로 계산), 장치 투자비용의 절감효과는 170만 달러에 달하므로 전체 화학공장에서 에너지 절약형 증류탑을 사용하면 비용절감 효과는 막대하다고 볼 수 있다.

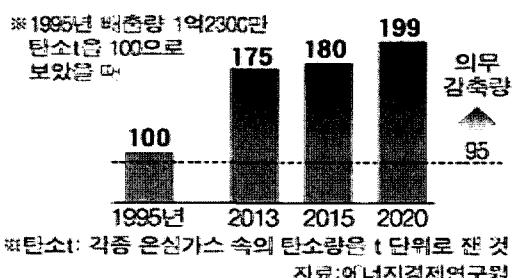
4. 분리벽형 열복합 증류탑의 활용현황

열복합형 증류탑의 상용화 형태인 분리벽형 구조에 대한 아이디어는 1950년대부터 알려져 있었으나 설계와 운전상의 기술적인 문제들로 인하여 최근에서야 상용화가 시작되었다. 학계에서는 1988년부터 주로 영국 멘체스터공대(UMIST)의 공정통합 연구센터에서 시뮬레이션과 pilot 실험을 통한 기본 설계와 제어에 관한 연구가 수행되어 오고 있어 산업체에 중요한 이론적 기반을 제공해 주고 있으며 네델란드의 DELFT 대학도 BASF 사와 활발한 산학협동 연구를 수행해 오고 있다. 이들 두 대학 모두 분리벽형 연구와 관련하여 EU(유럽연

합)의 정책적 연구지원을 받고 있다.

한국이 2013년부터 온실가스 감축 의무를 진다면

온실가스 배출 전망치



경제에 미치는 여파는

2013년

- 발전량 30% 축소
- 정유·철강·시멘트 생산량 50% 감소

- 원자재 품귀로 산업생산 감소
- 전기요금·집값 등 물가 폭등

- 경제성장 저하

- 2020년 실업률 10% 이상

그림 5. 한국의 온실가스 배출예상

산업체에서는 BASF, MW Kellogg, BP, Linde, Sasol, Uhde, JGC, Kyowa, Smitomo 등의 선진 석유화학회사와 엔지니어링 회사에서 상용화에 관한 본격적인 연구와 개발 및 적용이 진행되고 있는데 2006년 현재 전 세계적으로 약 60~70여 기의 상용규모 분리 벽 형 증류탑이 조업 중인 것으로 알려져 있다. 이 분리벽탑을 가장 많이 설치하여 운전 중인 회사는 BASF 사로서 Ruhrl 정유공장의 방향족 회수 탑의 revamp에 최초로 적용한 것을 시작으로 하여 현재는 자체로만 30 여개의 분리벽탑이 가동 중에 있다. MW Kellogg, BP, JGC는 파트너쉽을 구성하여 자체 license를 보유하고 있으며 1999년에 BP의 Coryton 정유공장의 기존 reformate 분리 탑의 revamp에 적용되어 30% 이상의 에너지 절감과 2배의 용량 증대와 50% 이상의 수율 증대 결과를 얻은 것으로 보고되었다. 최근 Linde 엔지니어링 사는 남아프리카의 Secunda 공장에 있는 Sasol 사의 1-octene 분리공정에 높이 64.5m, 직경 4m에 이르는 대형 분리 벽 형 증류탑을 건설하여 조업 중이다. Sumitomo 엔지니어링 사는 Kyowa 사와 공동으로 분리벽탑

에 대한 자체의 license를 개발하여 Kyowa Yuka 의 16,500mt/yr 에틸아세테이트 공장에 상용화하는데 성공한 이래 현재까지 6 기 이상의 상용급 분리벽탑을 설계 발주하고 있다. Krupp Uhde사는 열분해 가솔린으로부터 벤젠을 분리 제거 하는 분리벽탑을 제조하여 Veba Oel사에 설치, 조업 중에 있으며 Chevron 사에도 설치 예정으로 있다. 이밖에도 여러 선진 석유화학회사와 엔지니어링 회사에서 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 연구가 진행 중에 있다.

이에 더하여 추출증류 등과 같은 혼성 형 증류공정에 분리 벽 형 증류탑을 확장 적용하고자 하는 연구가 최근 들어 시도되고 있는데 MTBE의 생산 분리, 메틸아세테이트 생산 분리, TAME 생산 분리를 위한 상용 추출증류공정에 대하여 새로운 추출용매의 개발과 더불어 분리 벽 형 증류탑을 적용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 이와 같이 선진국의 엔지니어링사와 정유 및 석유화학 회사에서는 자체의 license를 개발 보유하고 실제 공정에 적용함으로써 상당한 에너지 절감 효과를 도모하고 있으며 아울러 관련분야에서의 엔지니어링 기술과 공정기술에서의 경쟁력 우위를 확보하는데 주력하고 있다.

열 복합 증류탑의 국내에서의 활용을 촉진하기 위해서는 실험적 연구의 결과를 제시하는 것이 필수적이나 아직 이러한 시도가 없어 국내 석유화학 업계에서의 활용은 이루어지지 못하고 있다. 그러나, 삼성종합화학은 기존의 증류방식을 개선하는 등, 여러 가지 에너지 절감노력의 결과로 2004년에는 5,310억 원의 경상이익을 실현하기에 이르렀다[7].

이러한 결실은 국내에서는 최초로 에너지 절약형 증류탑을 도입하여 에너지 사용을 절감하는 등의 과감한 공정 개선의

시도를 실시하였기 때문이다. 이러한 업계의 움직임을 고려하면 에너지 절약형 증류공정의 개발 연구가 지속적으로 실시하여 열복합 증류탑의 상용화를 하루 속히 이루어야 할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] 조순행, 화학공학회 특별심포지엄, p. 143, 2003.
- [2] Triantafyllou, C. and R. Smith, Trans IChemE, 70, part A, 118-132, 1992.
- [3] Amminudin, K. A., R. Smith, D. Y.-C., Thong and G. P. Towler, Trans IChemE, 79, part A, 701-715, 2001.
- [4] Kim, Y. H., Chem. Eng. J., 85, 289-301, 2002.
- [5] Kim, Y. H., Ind. Eng. Chem. Res., 40, 2460-2466, 2001.
- [6] 중앙일보, 5월 9일, E-3, 2003.
- [7] 한국화학공학회, 지속가능한 화학산업, 제3회 화학공학 마스터즈 심포지움, p.53, 2005.

저자약력



〈김 영 한〉

- 1952년 8월 21일생.
- 1976년 동아대학교 화학공학과 학사.
- 1980년 한국과학기술원 화학공학과 석사.
- 1984년 미국 Lamar Univ. 화학공학과 박사.
- 현재 동아대학교 화학공학과 교수. 관심분야는 화학공정설계, 화학공정제어, 화학공정센서.