

엑서지 해석에 근거한 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정의 에너지 이용 개선 방안

정연수

서울시립대학교 공과대학 화학공학과
130-743 서울특별시 동대문구 전농동 90

(2006년 5월 26일 접수; 2006년 6월 18일 채택)

Suggestions for Energy Utilization Improvement of Fractionation and Hydrodealkylation Units Based on Exergy Analysis

Yonsoo Chung

*Department of Chemical Engineering, University of Seoul
90 Jeonnong-dong, Tongdaemun-gu, Seoul 130-743, Korea*

(Received for review May 26, 2006; Revision accepted June 18, 2006)

요 약

엑서지 개념을 이용하여 BTX 공정의 일부인 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정에 대한 열역학적 해석을 실시하였다. 공정에 화학반응이 관계되는 까닭에 엑서지 값은 물리적 엑서지와 화학적 엑서지의 합으로서 구했으며 모든 계산은 공정의 조업자료를 바탕으로 한 전산 모사의 결과를 기반으로 하였다. 엑서지 손실을 구동 엑서지와 물질 엑서지 손실로 구분하여 정의하고 각각의 값을 구하였으며 그 결과를 바탕으로 공정의 에너지 이용 개선방안을 제시하였다. 엑서지 해석을 통해 공정의 내부에서 손실되는 엑서지 정확한 양과 그 위치를 파악할 수 있었으며 엑서지 해석이 산업생태학 개념의 이용과 손실방지책 연구를 위한 기초가 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

주제어 : 열역학적 해석, 엑서지, BTX 공정, 분별증류공정, 수소첨가알킬제거공정

ABSTRACT : Fractionation and hydrodealkylation (HDA) units, subparts of BTX plant, were thermodynamically analyzed using the notion of exergy. Exergy values were calculated as the sum of physical and chemical exergies due to the existence of chemical reactions. The analysis was based on the simulation results with the aid of real operating data. Driving and material exergy losses were separately defined and quantified. Locations and the reason of major exergy losses were identified and improvement strategies were suggested. It was noted that the exergy analysis could provide a sound base for adopting the concept of industrial ecology and developing loss prevention schemes.

Key words : thermodynamic analysis, exergy, BTX plant, fractionation unit, hydrodealkylation unit

1. 서론

1970년대의 석유위기 이래 에너지 절약과 효율 향상은 매우 중요한 이슈가 되어왔다. 열역학 제1법칙에 의하면 에너지는 열적, 물리적, 화학적 공정을 통해 생성되거나 손실됨이 없이 다만 그 형태가 바뀔 뿐이다. 이러한 열역학 제1법칙을 바탕으로 공정의 에너지 흐름을 분석하면 에너지의 이용 또는 전환 효율에 영향을 미치는 주요 변수와 그 영향의 크기를 구할 수 있다. 그러나 이러한 분석에 있어서 에너지는 항상 보존되기 때문에 시스템 내부에서 열역학적으로 취약한 부분을 파악하고 개선하는 데는 한계에 부딪히게 된다.

이에 비해 열역학 제2법칙에서는 주어진 열로부터 얻을 수 있는 일의 크기는 주어진 열이 갖는 에너지 크기에 비해 항상 작다는 것을 보이고 있다. 엑서지 해석은 에너지의 양적 보존을 의미하는 열역학 제1법칙뿐 아니라 에너지의 질적 손실을 정량화하는 열역학 제2법칙까지를 기반으로 한 것으로 시스템 내부에서의 에너지의 손실 및 그 분포 등을 포함한 보다 상세한 분석을 가능하게 한다. 엑서지 개념을 이용하여 공정의 에너지 흐름을 분석하면 에너지 손실의 위치 및 크기를 정확히 파악하는 것은 물론 이용 효율을 높일 수 있는 방안을 마련할 수 있다.

더욱이, 에너지 이용효율이 높다는 것이 환경에 미치는 영향이 작다는 것을 고려한다면 에너지 소비 및 그에 따른 환경 영향을 줄이는데 미치는 엑서지 해석의 효과를 이해할 수 있을 것이다[1]. 이러한 이유로 지난 30년간 엑서지 개념을 이용한 시스템의 열역학적 해석이 급격히 늘어났다.

여기서는 이러한 엑서지 개념을 이용하여 벤젠, 톨루엔, 자이렌 등의 방향족화합물을 생산하는 BTX 공정의 열역학적 해석을 통해 공정에서의 에너지 이용실태를 파악하고 그 개선방향을 모색하고자 하였다. 본 논문에서는 BTX 공정의 일부인 분별증류공정(Fractionation Unit)과 수소첨가알킬제거공정(Hydrodealkylation Unit: HDA)에 대하여 실시하였던 엑서지 해석의 방법, 내용 및 그 결과를 살펴보기로 한다.

2. 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정

본 논문의 해석 대상인 BTX 공정은 나프타 분해공정의 부산물인 열분해가솔린(Pyrolysis Gasoline)을 주원료로 한다. 이러한 BTX 공정은 Figure 1에서 볼 수 있듯이 수소첨가(Hydrotreating), 추출(Extraction), 분별증류(Fractionation) 및 수소첨가알킬제거(Hydrodealkylation) 공정의 4부분으로 구성되어있다. 수소첨가공정에 투입된 열분해가솔린은 수소와 반응하여 Heart Cut이라 불리는 C6~C8 성분으로 전환된 후 분리되어 추출공정으로 투입된다. 추출공정에 투입된 Heart Cut은 Sulfolane에 의해 방향족화합물과 비방향족화합물로 분리된다. 추출물인 방향족화합물은 분별증류공정과 수소첨가알킬제거공정을 거쳐 주 생성물인 벤젠, 톨루엔, 자이렌 등으로 분리, 정제된다.

Figure 2는 본 논문의 분석 대상인 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정 내부의 주요 장치 및 흐름을 보인 것이다. Figure 2에서 볼 수 있듯이 분별증류공정은 클레이타워와 벤젠, 톨루엔, 자이렌, 솔벤트 칼럼 등 5개의 증류탑으로 이루어져 있으며

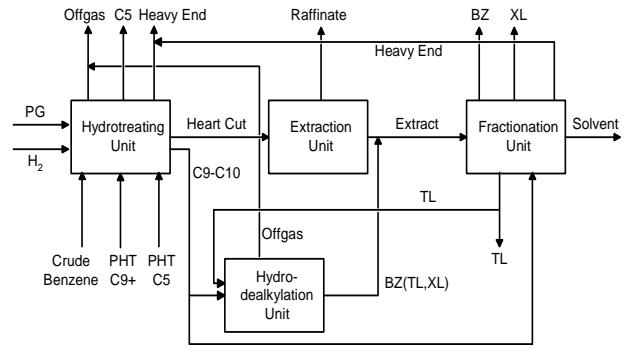


Figure 1. Schematic diagram of BTX plant.

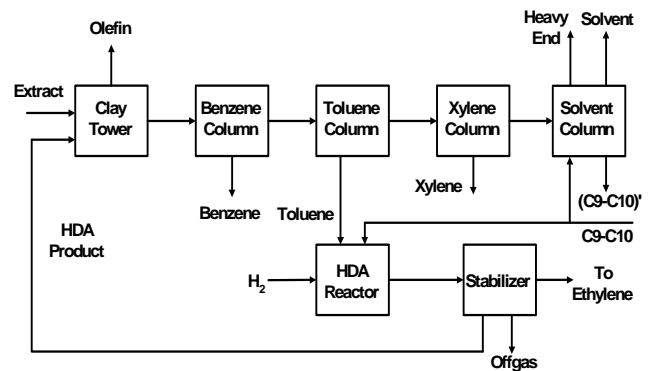


Figure 2. Schematic diagram of fractionation and HDA units.

수소첨가알킬제거공정은 반응기와 Stabilizer라는 증류탑으로 이루어져있다. 이들 공정은 이들 장치 이외에도 많은 수의 온도 및 압력조절 장치들로 구성되어있다. 분별증류공정에서는 추출공정으로부터 투입된 방향족화합물과 수소첨가알킬제거공정으로부터 되먹임 되는 벤젠 등이 증류공정을 통해 벤젠, 톨루엔, 자이렌 등으로 분리된다. 수소첨가알킬제거공정은 벤젠과 톨루엔의 시장 가격의 변화 등 시장 상황에 따른 생산물 조성의 조절을 위해 이용된다. 이 공정에서는 수소첨가공정에서 생산된 C9~C10 성분과 분별증류공정에서 생산된 톨루엔의 일부가 수소와 반응하여 벤젠과 메탄을 생성한다.

3. 엑서지

열역학 제1법칙에 근거한 에너지 해석은 에너지의 크기와 분포를 아는 데는 도움을 주지만 에너지의 손실과 그 크기 및 분포를 설명할 수 없다. 이런 이유로, 각 공정에서 손실되는 에너지의 양과 그 위치 및 이유 등, 보다 구체적인 정보를 제공해주는 엑서지 해석이 중요시되고 있다. 엑서지라는 개념은 열역학 제1법칙 및 제2법칙에 근거한 것으로서, 일정 상태에 있는 단위질량의 물질이 주위와 평형이 될 때까지 생산해 낼 수 있는 일의 최댓값으로 정의된다[2]. 이 경우 주위 환경은 완전한 열역학적

평형상태에 있는 매우 큰 매체이며 주위 환경의 일부분들 사이의 상호작용에 의한 일의 생성은 없다고 가정한다[3].

열역학 제2법칙에 근거한 에너지 해석에는 엔트로피 해석, 네 겐트로피 해석, 엑서지 소비 해석, 엑서지 해석 등 다양한 방법론이 이용되어왔는데 이 가운데 엑서지 해석이 가장 포괄적이고 풍부한 정보를 제공한다고 알려져 있다. 엑서지 개념의 오랜 역사에도 불구하고 그 이용이 제한되었던 것은 이 분야에서 사용하였던 표현과 기호들이 서로 많이 달랐기 때문이다. 이로 인해 서로 다른 응용분야에는 여러 형태의 서로 다른 제2법칙적 해석 방법들이 이용되어 왔다[4, 5].

엑서지는 계산의 편의를 위해 일반적으로 물리적 엑서지 (Physical Exergy)와 화학적 엑서지(Chemical Exergy)로 나눈다. 물리적 엑서지는 일정량의 물질이 주어진 조건으로부터 25°C, 1atm을 기준으로 하는 표준조건까지 가역공정을 통해 열역학적 평형에 도달하기까지 얻을 수 있는 최대일로 정의되며, 다음 식으로 표현된다.

$$E_{phy} = (H - H_o) - T_o(S - S_o) \quad (1)$$

여기서 E , H , T 및 S 는 각각 엑서지, 엔탈피, 온도 그리고 엔트로피를 의미하며 첨자 phy 는 물리적 엑서지를 그리고 o 는 표준상태를 나타낸다. 이에 비해 화학적 엑서지는 공정 중 순수한 상태의 성분들과 그 성분들의 표준상태 사이의 화학적 퍼텐셜 차이로 정의되며[6], 다음 식으로 표현된다.

$$E_{che} = \sum x_i E_{che}^o + RT_o \sum x_i \ln \gamma_i x_i \quad (2)$$

여기서 x , R 및 γ 는 각각 성분의 몰분율, 기체상수 그리고 활동도계수이며 첨자 che 는 화학적 엑서지를 그리고 i 는 성분을 나타낸다.

4. 엑서지 해석

4.1. 공정 모사

엑서지의 계산을 위한 기초 작업으로서 공정의 물질수지 및 에너지수지를 맞추기 위한 전산모사 작업이 먼저 실시되었다. 전산모사를 위한 기본 데이터는 실제 상용공정의 조업자료가 이용되었으며 전산모사에는 상용 정상상태모사기인 ASPEN PLUS를 이용하였다. BTX 공정의 주원료인 열분해가솔린이 매우 많은 화합물의 혼합체이기 때문에 계산 결과를 실제 조업자료와 맞추기 위하여 62개의 대표 물질을 조합하여 물성치를 조절하였다[7]. 모든 계산은 상위 공정인 수소첨가공정에 투입되는 열분해가솔린 415 kg-mole/hr 및 수소 398 kg-mole/hr 등을 기준으로 실시되었다. 계산에 필요한 물성치는 Reid 등[8]과 ASPEN PLUS의 데이터베이스[9]로부터 획득하였다. 물성치의 계산에는 정유 및 석유화학 응용 계산에 많이 이용되는 Peng-Robinson 상태방정식을 이용하였다. Table 1은 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정의 전산모사에 이용되었던 주요 단위공정의 매개변수의 값을 정리한 것이다. 공정의 전산모사를 통해 공정을 이루는 각 흐름들의 유량, 조성, 온도, 압력, 엔탈피 및 엔트로피 값을 얻었으며 여러 유틸리티 흐름들의 Heat Duty 또한 얻을 수 있었다.

4.2. 엑서지 해석

공정 모사를 통해 얻어진 각 공정 흐름의 유량, 조성, 온도, 압

Table 1. Specifications on major devices of fractionation and HDA units

	clay tower	benzene column	toluene column	xylene column	solvent column	HDA reactor	stabilizer
number of tray		78	70	47	35		85
feed tray		48, 1	48, 1	26, 1	30, 1		15, 1
side tray		5			10, 11, 12		
pressure (kg/cm ² -g)	11.2	0.13 ~0.55	3.45 ~3.95	0.1~1	0.51~0.78	60.2 ~59.9	8.1~8.5
temperature (°C)	160	64.1 ~138	171.6 ~208.3	153 ~194.7	176.2 ~194.3	567 ~627	158~209
main feed flowrate (kmol/hr)	300	300	108	21	40	2576	90
recycled feed flowrate (kmol/hr)		405	162	33	48		57
top flowrate (kmol/hr)		405	249	51	68		60
bottom flowrate (kmol/hr)	300	108	21	3	5	2560	87
side flowrate (kmol/hr)	0.01	192			15		

력, 엔탈피, 엔트로피 등의 값과 유틸리티 흐름들의 Heat Duty 정보로부터 각 흐름이 갖는 엑서지 값이 계산되었다. 분별증류 공정과 수소첨가알킬제거공정은 증류 및 화학반응에 의한 화합물의 조성 변화가 매우 크기 때문에 엑서지 계산에 있어서 화학적 엑서지가 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 이유로 본 연구에서는 엑서지의 값을 물리적 엑서지와 화학적 엑서지의 합으로 계산하였으며 이 계산에는 위의 식 (1)과 (2)가 이용되었다. 화학적 엑서지를 계산하는데 있어서 Szargut 등[6]의 자료를 이용하였으며 공정의 각 흐름이 갖는 엑서지 값은 실제공정의 조업자료를 이용하여 실시된 공정모사의 결과를 바탕으로 Hinderink 등 [10]의 방법을 이용하여 계산하였다.

계산된 각 흐름들의 엑서지 값으로부터 각 단위장치들의 엑서지 수지를 확립하였는데 각 장치에서의 엑서지 손실값은 장치에 투입되는 모든 종류의 흐름들이 갖는 엑서지 값의 합으로부터 장치에서 유출되는 모든 흐름들이 갖는 엑서지 값의 합을 뺀으로써 계산하였다. 이렇게 얻어진 엑서지 값의 차이는 열역학 제2법칙에 의해서 각 장치를 구동하는데 필수적으로 소비되는 엑서지라고 해석되며 본 논문에서는 이를 구동 엑서지 손실(Driving Exergy Loss)이라 정의하였다. 구동 엑서지 손실은 엑서지 수지를 세우는 시스템의 경계에 따라 각 단위장치뿐 아니라 서로 연결되어 있는 일련의 장치군, 더 나아가 공정 전체에 대하여 그 크기를 계산할 수 있다. 본 논문에서는 각 단위장치에서의 구동 엑서지 손실을 먼저 구하고 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정을 구성하는 모든 단위장치에서의 구동 엑서지 손실값을 합함으로써 공정 전체의 구동 엑서지 손실의 크기를 계산하였다. 공정 전체의 구동 엑서지 손실의 크기는 129 GJ/hr임을 알 수 있었다.

Figure 3은 공정을 이루고 있는 각 단위장치에서의 구동 엑서지 손실의 크기를 상대적으로 비교하여 나타낸 것이다. Figure 3으로부터 공정을 이루고 있는 전체 42개의 단위장치 가운데 단지 5개의 장치가 전체 구동 엑서지 손실의 60%를 차지하고 있음을 알 수 있다. 이들 5개의 장치는 모두 증류탑으로서 특히 벤젠 증류탑에서의 구동 엑서지 손실이 전체의 25%로서 가장

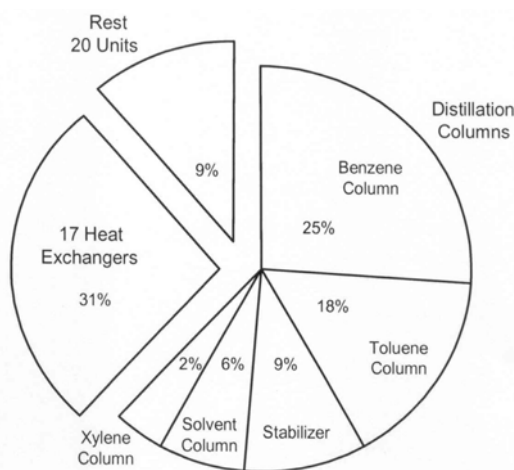


Figure 3. Distribution of Driving Exergy Losses.

크다는 것을 알 수 있다. 이는 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정의 에너지 이용 효율을 증대시키기 위해서는 벤젠 증류탑을 필두로 하여 증류탑들에서의 운전 효율을 향상시키는 것이 중요함을 보인 것이다.

구동 엑서지 손실 이외에 고려하여야 하는 또 다른 형태의 중요한 엑서지 손실은 주 생산물 이외의 부산물이나 폐기물의 형태로 공정 밖으로 유출되는 엑서지일 것이다. 공정에서 생산되는 부산물의 경우 하위 공정이나 다른 공정에서 이용되지 않는다면 결국은 폐기물과 같이 주위 환경으로 배출될 것이며 이렇게 이용되지 못한 부산물이나 폐기물이 화학적 에너지의 형태로 가지고 있는 엑서지는 이용되지 못하고 버려지게 될 것이다. 여기서는 이렇게 이용되지 못하는 화합물의 형태로 발생하는 엑서지의 손실을 물질 엑서지 손실(Material Exergy Loss)이라 정의하였다.

물질 엑서지 손실은 각 단위장치에서 확립한 엑서지 수지의 시스템 경계를 해석의 최종 단위까지 확장함으로써 얻을 수 있다. 여기서는 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정을 구성하는 각 단위장치에서의 엑서지 수지를 모두 합하여 공정 전체에서의 엑서지 유입 및 유출을 관찰함으로써 공정으로부터 손실되는 물질 엑서지의 크기를 구하였다. 이 경우 이웃하는 장치들의 엑서지 수지가 합해지고 각 장치에서의 구동 엑서지 손실값 역시 합해진다. Figure 4는 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정을 이루고 있는 주요 장치들에서의 엑서지 수지가 합해지는 과정을 보인 것이며 Figure 5는 최종적으로 공정 전체에 대한 엑서지 수지를 보인 것이다.

Figure 4는 각 단위장치에서의 엑서지 유출입 및 손실은 물론 각 장치 사이에 분배되는 엑서지의 크기를 상세히 보인 것으로 괄호 안의 숫자는 각 흐름이 갖는 엑서지의 값을 나타내며 각 흐름의 굵기는 각 흐름의 엑서지 값에 비례하는 크기로 그려진 것이다. Figure 4와 같은 도표는 엑서지 수지를 계산하는 모든 크기의 시스템 경계에 대하여 확립할 수 있으며 이를 통해 공정 내부에서의 엑서지 손실의 정량화는 물론 손실이 일어나는 정확한 위치의 파악을 가능하게 한다.

Figures 1과 2에서 보인 것과 같이 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정에서의 주요 생산물은 벤젠, 자이렌 및 용제 등이다. Figure 5는 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정에 투입된 엑서지의 56%가 벤젠과 자이렌 등 주요 생산물로 전환되었음을 보이고 있다. 용제가 회수되어 재사용되는 경우 투입 엑서지의 64%가 유용한 화합물로 전환되었음을 알 수 있다. 이들 유용 생산물 이외에 다른 생산물들이 갖는 엑서지는 모두 318 GJ/hr로 이것이 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정에서의 물질 엑서지 손실에 해당되며 그 크기는 구동 엑서지 손실의 약 2.5배에 달함을 알 수 있다.

5. 에너지 이용 개선 및 손실 방지 방안

엑서지의 정의에 의하면 표준 환경 자체가 갖는 엑서지 값과 환경과 평형 상태에 있는 시스템이 갖는 엑서지 값은 0이다. 이러한 사실로부터 어떤 물질 또는 시스템이 갖는 엑서지 값은 그

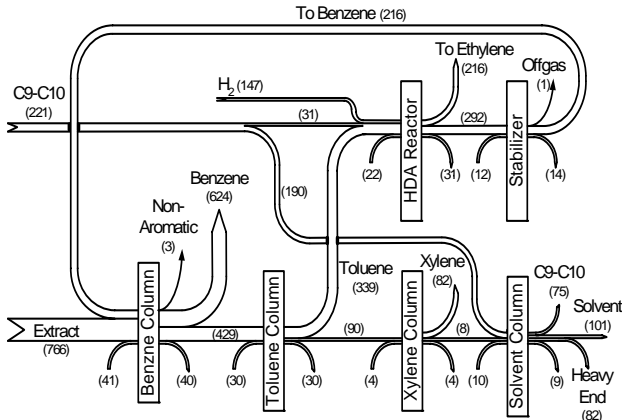


Figure 4. Exergy flows among functional blocks of fractionation and HDA units.

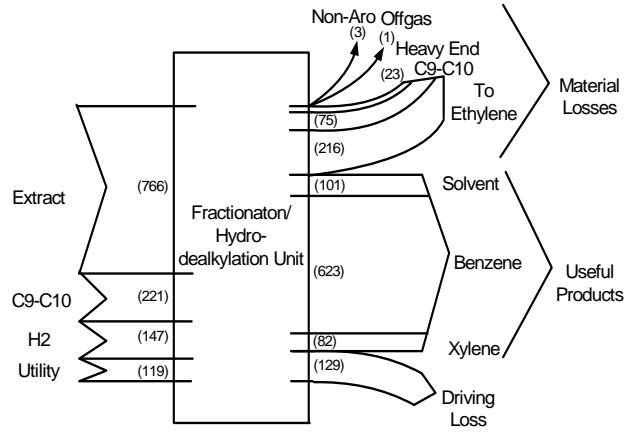


Figure 5. Exergy inventories of fractionation and HDA units.

것이 주위 환경과 평형인 상태로부터 떨어진 정도를 나타내는 한 척도가 될 수 있음을 알 수 있다. 이는 엑서지가 에너지 관련 해석 도구 뿐 아니라 환경 문제에 대한 해석의 도구 역시 될 수 있음을 의미하는 것이다.

앞에서 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정으로부터 발생하는 구동 엑서지 손실의 60%가 5개의 증류장치로부터 기인하며 증류공정에서의 에너지 이용 효율 증대가 다른 단위공정에서의 그것에 비해 공정 전체에 미치는 영향이 크다는 것을 보았다. 증류 공정에서의 큰 구동 엑서지 손실은 증류공정을 통해 열에너지 형태의 엑서지가 화합물의 화학적 엑서지로 변환되는 과정에서 많은 양의 엑서지가 손실됨에 따른 것으로 판단된다. 이러한 구동 엑서지의 손실을 줄이는 방안으로서 다음 두 가지를 생각할 수 있을 것이다. 먼저 각각의 증류탑에 대한 보다 엄밀한 조업 상태 감시 및 최적제어를 통해 각 증류탑에서의 손실 최소화를 꾀할 수 있을 것이다. 기존 증류탑의 설계 및 운전 방식은 원하는 분리생성물의 농도를 보장하는 것을 그 최적화의 기준으로 삼았으나 공정시스템 기술의 발전과 더불어 과거의 기준을 만족하면서도 공정에서의 엑서지 이용효율을 최대화시킬 수 있는 다변수최적화(Paleto Optimization) 기술을 도입할 수 있을 것이다. 또한 핀치기술 등을 이용하여 증류탑 상호간에, 나아가 전체 공정을 구성하는 다른 단위공정과의 사이에 교환, 대체할 수 있는 에너지의 양을 최대화하여 증류공정에서 발생하는 손실을 줄일 수 있을 것이다.

분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정의 엑서지 해석의 결과로부터 물질 엑서지 손실의 크기는 구동 엑서지 손실의 약 2.5배에 달함을 알 수 있었다. 이는 물질 엑서지 손실을 줄이는 것이 구동 엑서지 손실을 줄이는 것보다 에너지의 효율적인 이용에 있어서 더욱 효과적임을 의미한다. 환경에 버려지는 이러한 물질 엑서지는 공정의 열역학적 효율을 감소시킬 뿐 아니라 환경에 버려짐으로써 환경에 여러 가지 영향을 미침은 물론 그 영향의 저감 또는 배제를 위해 또 다른 에너지의 투입을 필요로 하는 악순환을 일으키게 될 것이다. 엑서지 해석의 결과는 이러한 영향을 사전에 방지할 수 있는 틀을 제시하고 있다. 분별증류 및

수소첨가알킬제거 공정의 경우, 주요 생산물은 벤젠, 톨루엔, 자이렌 등이다. Figure 5는 이들 방향족 화합물 외에 공정에서 유출되는 주요 흐름으로 Solvent, To-ethylene, Heavy End 및 C9~C10 흐름 등이 있음을 보이고 있다. 이들 흐름 가운데 용제의 형태로 회수되는 Solvent 흐름은 자체 또는 타 공정에서 이용되는 경우 물질 엑서지 손실에서 제외될 수 있다. 마찬가지로 BTX 공정의 외부에 존재하는 에틸렌 공정으로 투입되는 To-ethylene 흐름 역시 환경에 버려지지 않고 다른 공정의 투입물로 이용되는 경우 물질 엑서지로 손실되는 것이라 볼 수 없다. 이 두 경우를 고려할 때 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정에서의 실질적인 물질 엑서지 손실의 크기는 102 GJ/hr로 감소하게 되어 그 크기는 구동 엑서지 손실의 그것보다 작아질 수 있다. 이 경우 물질 엑서지 손실은 주로 Heavy End와 C9~C10 흐름에 의해 발생하며, 이러한 사실은 향후 이들 물질들을 이용할 수 있는 계획을 세우는데 많은 도움을 줄 수 있을 것이다. 이와 같이 엑서지 해석의 결과를 바탕으로 공정으로부터 유출되는 모든 물질 흐름들에 대하여 회수 재사용 및 다른 용도로의 사용 방안을 마련할 수 있을 것이며 이를 통해 공정 전체의 손실을 방지할 뿐 아니라 에너지 이용 상태를 획기적으로 개선할 수 있을 것이다. 이러한 분석을 통해 엑서지 해석이 산업생태학[11]의 개념을 공정의 설계 및 운전에도 도입하는데 과학적 기초를 제공할 수 있음을 확인 할 수 있다.

앞서 살펴본 개선 방안 외에 또 다른 시스템 효율 향상 방안은 Figure 4와 같은 도표의 보다 세밀한 분석을 통해 가능할 것이다. Figure 5는 Solvent와 To-ethylene 흐름을 물질 엑서지 손실에서 제외하는 경우 Heavy End와 C9~C10 흐름 등이 물질의 형태로 손실되는 엑서지의 96%에 달함을 보이고 있다. 즉 이 공정에서의 주요 엑서지 손실은 Heavy End와 C9~C10 두 흐름에 의해 발생함을 알 수 있다. 이 두 흐름에 의한 손실을 줄이기 위해서는 이들 흐름을 공정 내부 혹은 외부에서 적절히 이용할 수 있는 방안을 찾거나 그 발생을 근본적으로 차단해야 할 것이다. 전자의 경우 앞서 설명한 산업생태학적 접근을 통해 그 해결책을 마련할 수 있을 것이며 후자의 경우 기존의 공정시스

템기술적 접근 방식으로 그 해결책을 마련할 수 있을 것이다. Figure 4는 Heavy End와 C9~C10 흐름이 솔벤트 칼럼에서 발생함을 보이고 있다. 이들 흐름들은 근본적으로 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정의 상위공정인 수소첨가공정과 추출공정에서 기인함을 알 수 있다. 이러한 방식으로 물질 엑서지 손실의 원인이 되는 흐름의 원인 제공자를 공정의 최상위 부분까지 추적하여 밝힐 수 있는 것이 엑서지 해석이 갖는 장점 가운데 하나이다. 손실의 정확한 위치와 근원을 밝힐 수 있는 이러한 엑서지 해석 방법과 공정 각 부분에서의 모든 정량적 자료를 추적할 수 있도록 하는 공정 모사 기술을 연계한다면 보다 근원적인 손실에 대책을 마련할 수 있을 것이다.

6 결 론

엑서지 개념을 이용하여 분별증류 및 수소첨가알킬제거 공정에 대한 열역학적 해석을 실시하였다. 공정을 구성하는 각 흐름의 엑서지 값은 실제 공정 조업자료를 바탕으로 한 전산모사의 결과로부터 계산하였다. 각 단위공정에서의 엑서지 수치를 바탕으로 공정을 이루는 모든 부분에서의 엑서지 손실을 정량화할 수 있었다. 엑서지의 손실은 구동 엑서지 손실과 물질 엑서지 손실로 구분하여 각각 정량화하였다. 공정의 구동에 필요한 구동 엑서지 손실은 물질 엑서지 손실에 비해 작았으며 대부분의 손실이 증류탑에서 발생함을 확인하였다. 벤젠 증류탑이 열역학적으로 가장 취약한 단위공정이라는 것을 알 수 있었다. 물질 엑서지 손실은 Heavy End와 C9~C10 흐름에 의하여 발생하며 이들 흐름은 다시 상위공정인 수소첨가공정과 추출공정에서 기인함을 확인하였다. 엑서지 해석을 통한 손실의 정량화 작업을 통해 손실의 종류, 크기 및 원인을 파악할 수 있었으며 그 방지책을 제시할 수 있었다.

사용기호

<i>E</i>	molar exergy (J/mole)
<i>H</i>	molar enthalpy (J/mole)
<i>R</i>	universal gas constant (8.314 J/mol/K)
<i>S</i>	molar entropy (J/mole/K)
<i>T</i>	temperature (K)
<i>x</i>	mole fraction
Greek letter	
γ	activity coefficient
Superscript	
<i>o</i>	pure component at reference condition (25°C, 1atm)
Subscripts	
<i>che</i>	chemical
<i>i</i>	component
<i>o</i>	reference condition (25°C, 1atm)
<i>phy</i>	physical

감 사

이 연구는 2005년도 서울시립대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Rosen, M. A. and Dincer, I., "On Exergy and Environmental Impact," *Int. J. Energy Res.* **21**, 643 (1997).
- Sussman, M. V., "Availability (Exergy) Analysis: A Self Instruction Manual," 2nd ed., Mulliken House, Lexington, 1981, pp.I.2-I.27.
- Kotas, T. J., "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis," 2nd ed., Krieger Publishing Company, U.S.A., 1995, pp.32-50.
- Lucca, G., "The Exergy Analysis: Role and Didactic Importance of a Standard Use of Basic Concepts, Terms and Symbols," *Proc. of A Future For Energy (Flowers '90)*, Pergamon Press, 295 (1990).
- Kotas, T. J., Raichura, R. C., and Mayhew, Y. R., "Nomenclature for Exergy Analysis. In second Law Analysis of Thermal Systems," *Am. Soc. of Mech. Eng.*, 171 (1987).
- Szargut, J., Morris, D. R., and Steward, F. R., "Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes," Hemisphere, New York, 1988, pp.297-313.
- Cho, H.-E., "Thermodynamic Analysis of a BTX Plant Based on Exergy," Master's Thesis, Department of Chemical Engineering, University of Seoul, 2001.
- Reid, R. C., Prausnitz, J. M., and Poling, B. E., "The Properties of Gases and Liquids," 4th ed., McGraw-Hill, New York, 1986, pp.656-732.
- AspenTeck, "Physical Property Methods. Steady State Simulation ASPEN PLUS 10," Elan, California, 1999, pp.2.1-2.18.
- Hinderink A. P., Kerkhof F. P. J. M., Lie A. B. K., De Swaan Arons J., and Van Der Kooi H. J., "Exergy Analysis with a Flowsheeting Simulator-I. Theory, Calculating Exergies of Material Streams," *Chem. Eng. Sci.*, **51**, 20 (1996).
- O'Rourke D., Connelly L., and Koshland C. P., "Industrial Ecology: a Critical Review," *Int. J. Environ. Pollut.*, **6**, 2/3 (1996).