

유틸리티 절감을 위한 미반응 스티렌 모노머 회수공정의 설계

봉주영 · 나수진* · 이광순*[†]

롯데첨단소재 여수사업장
59616 전라남도 여주시 산단로 334-27
*서강대학교 화공생명공학과
04107 서울특별시 마포구 백범로 35

(2016년 9월 27일 접수, 2016년 11월 8일 수정본 접수, 2016년 11월 9일 채택)

Process Design for Recovery of Unreacted Styrene Monomer for Utility Saving

Jooyoung Bong, Sujin Na* and Kwang soon Lee*[†]

Yeosu plant, Lotte Advanced Materials, 334-27, Sandan-ro, Yeosu, Jeonnam, 59616, Korea

*Department of Chemical & Biomolecular Engineering, Sogang University, 35, Baekbeom-ro, Mapo-gu, Seoul, 04107, Korea
(Received 27 September 2016; Received in revised form 8 November 2016; accepted 9 November 2016)

요 약

ABS 중합과정 중 잔류 모노머 회수 공정의 유틸리티 사용량 절감을 위한 공정의 개선을 수행하였다. ABS 폴리머 생산 과정 중 잔류 모노머 회수 공정은 제품의 품질 향상을 위해 반드시 필요하다. 잔류 모노머의 회수를 위한 다양한 방식이 있으나, 본 연구에서 대상으로 한 것은 스팀 스트리핑 공정이다. 기존의 스팀 스트리핑은 많은 양의 스팀과 냉각수가 사용되고 있으나, 본 연구를 통해 유틸리티 사용을 절감하는 새로운 방안을 찾고자 하였다. 스트리핑 후 모노머와 함께 배출되는 스팀의 잠열을 진공상태의 수증기로 회수하고, 압축으로 온도를 상승시켜 스트리핑 스팀으로 재사용하도록 함으로써 스팀의 사용을 획기적으로 절감하였다. 또한 모노머 최종 회수 과정에서 발생하는 물을 모노머 응축에 냉각수로 활용함으로써 용수에 대한 사용량도 감소 시킬 수 있었다.

Abstract – A study for process design to curtail the utility consumption during residual styrene monomer recovery in an ABS polymerization process was carried out. Among different techniques for residual monomer recovery, the steam stripping is dominantly employed in industries. The existing process, however, consumes a large amount of utility (steam and cooling water), and this study focused on the design of a new process that can substantially spare the utility consumption. A new process was configured to utilize the latent heat of the stripping steam, which is condensed with the monomer using cooling water after exiting the stripper. The condenser was modified to use vacuum state water as coolant and to generate vacuum state steam using the latent heat of the stripping steam. The steam is injected to the stripper as the stripping steam after upgrading using a compressor. Through this modification, consumption of steam and also cooling water could be significantly reduced at some expense of electricity for compressor operation.

Key words: ABS polymerization, Steam stripping, Styrene monomer recovery, Heat integration, Utility saving

1. 서 론

석유화학 산업의 경쟁이 심화되고 있는 가운데, 특히 플라스틱 산업은 다른 석유화학 산업에 비하여 상대적으로 낮은 진입장벽으로 시장경쟁이 더욱 심화되고 있다. 지금까지 국내 많은 기업들은 높은 품질 경쟁력으로 시장에서 주도적인 위치를 점하고 있었으나,

중국, 중동 등 후발 국가들의 빠른 발전으로 품질 수준에 대한 격차가 점차 줄어들어, 품질 경쟁력에서의 차이는 사라지고 있다. 또한, 중국의 상대적으로 낮은 인건비와 중동의 원재료 가격 경쟁력으로 인하여, 국내 플라스틱 산업은 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 어려움의 극복을 위하여 두 가지 방안이 요구되고 있는데, 하나는 특수한 기능을 갖춘 고부가 소재의 개발이고, 다른 하나는 기존 제품의 원가 경쟁력 확보이다. 특히 플라스틱 산업의 절대적인 점유율을 차지하고 있는 범용 제품의 경우 원가 경쟁력 확보가 매우 중요하여, 현장 중심의 원가개선의 노력이 치열하게 전개되고 있다. 본 연구에서 다룬 ABS 폴리머는 대표적인 범용 플라스틱으로 품질에 대한 진입장벽이 낮으며, 각 생산자 간 품질 차이가 크지 않아, 제

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kslee@sogang.ac.kr

‡이 논문은 서강대학교 유기공 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

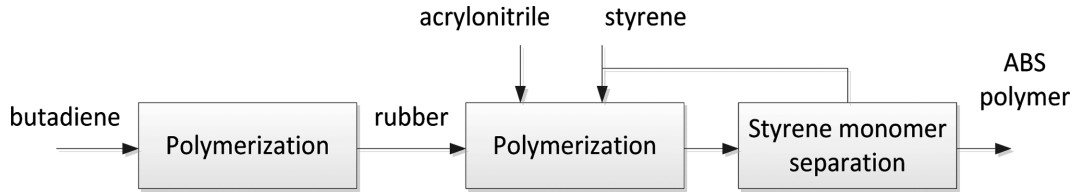


Fig. 1. Simplified flow of the ABS polymerization process.

품 경쟁력 확보를 위한 원가 개선이 중요시 된다. 현재 ABS 폴리머 제조비용 중 재료비와 인건비를 제외한 유틸리티 및 기타 제조비용이 약 147,000 원/톤 수준으로, 원재료 가격에 대한 조정이 불가능한 상황에서 제품의 원가 개선을 위해서는 유틸리티 등의 제조 비용 절감이 매우 중요하다.

본 연구에서 개선하고자 하는 공정은 ABS 폴리머 제조 공정의 한 부분이며 여기서 생산된 제품은 ABS 수지의 주 원료로 사용되며, 그 함량이 제품의 30~40%를 차지하는, ABS 수지의 원가 및 품질에 큰 영향을 미치는 매우 중요한 원료이다. ABS 폴리머 생산 공정은 Fig. 1에 간략히 보였다. 크게 고무를 생산하는 공정과 최종 중합 공정으로 구분된다. 잔류 스티렌 모노머에 대한 회수 공정은 중합공정의 여러 단계 중 하나이다. 중합 반응을 거친 생성물에 잔류하고 있는 스티렌 모노머는 최종 제품의 품질에 악영향을 준다. 따라서, 별도의 공정을 통해 회수하여 제품의 품질을 향상시키고, 회수된 모노머는 재사용 함으로써 원가절감도 함께 수행하고 있다.

폴리머 내 잔류 모노머의 회수 방법은 기존에 많은 연구가 있었으며, 다양한 방법이 소개되고 있다. 가장 보편적으로 화학 산업에 적용되고 있는 기술은 스팀 스트리핑과 공기 스트리핑으로, 두 기술의 차이는 폴리머 내 잔류 모노머의 기상으로의 회수를 위해 스팀과 공기 중 무엇을 사용하는 가에 있다. 스팀 스트리핑도 설비 및 운전방식에 따라, 회분형 공정[1,2]과 연속형 공정[3]의 두 가지로 구분할 수 있다. 본 연구에서 대상으로 한 ABS 중합공정에서는 반응기 이후 저장고에서 스트리퍼로 연속적으로 생성물을 투입하는 연속형 공정이 적용되고 있다.

스트리퍼의 운전을 간단히 설명하면 다음과 같다. 스트리퍼 상부를 통해 반응기에서 생산된 라텍스 형태의 생성물이 공급되며, 하부에서 스팀을 공급하여 스트리퍼 내부에서 스팀과 생성물이 접촉, 미 반응 모노머를 스팀과 함께 스트리퍼 상부로 회수한다. 이때 스트리퍼로 투입되는 스팀 양이 증가하면 모노머 회수율이 증가하나, 스팀 비용은 증가하게 된다. 따라서, 스팀 사용 증가에 따른 비용 발생과 모노머 회수 및 재사용에 따른 경제적인 효과를 고려하여 적정 회수율을 결정하게 된다. 스팀은 현재 공장 내에서 소비되는 여러 유틸리티 중 단위 가격이 가장 높은 유틸리티로, 적정 회수율의 결정은 제조비용의 최적화 측면에서 매우 중요하다.

생성물과 스팀의 접촉을 통해 스트리퍼 상부로 회수된 증기 상태의 모노머는 응축 및 분리 공정을 거치게 되며, 이 과정을 통해 회수된 모노머는 중합공정에서 재사용 된다. 스트리퍼 후속 공정에서 증기의 응축을 위해서는 냉각수가 필요하며, 모노머 회수 과정에서 물도 함께 회수되는데, 이 때 냉각수와 회수된 용수는 별도의 재사용 없이 폐수로 처리된다. 이러한 잔류 모노머 회수 공정에서 사용되는 많은 양의 유틸리티는 모두 제조비용에 포함되어 제품가격 상승의 원인이 된다. 따라서, 제품 원가 절감을 위해 공정에서 발생하는 열을 회수하여 재사용하고, 용수를 재활용하여 기존 공정에서

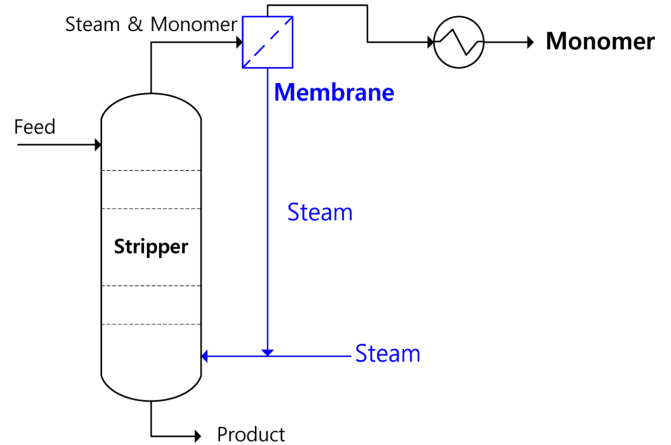


Fig. 2. Steam recycle using membrane separation.

사용되는 냉각수의 사용을 절감하고자 하였다.

스팀 스트리핑에서 유틸리티 절감을 최근 많이 연구되는 주제로 분리막을 이용한 공정이 있다. 이 공정은 Fig. 2와 같이 스트리퍼에서 배출되는 수증기 형태의 모노머와 스팀을 분리막을 이용하여 분리하고, 스팀을 다시 스트리퍼로 투입해 재사용한다.[5-7] 그러나 분리막의 청소 및 교체 등의 운영상 문제점과 분리된 스팀의 공급량을 일정하게 유지하는 문제 등으로 기존 공정에 적용이 불가능한 것으로 판단되었다. 따라서, 열 통합을 이용한 에너지 회수 방법으로 공정에 대한 개선을 실시하였다.

본 연구에서는 모노머 회수공정에서 스트리퍼 상부로 배출된 스팀과 모노머를 열 교환기에서 응축하는 동안 발생하는 열을 회수하여, 모노머를 포집하는 스트리퍼에 재사용함으로써 기존에 투입되던 스팀의 상당량을 대체할 수 있도록 했다. 이 과정에서 회수된 열의 낮은 압력과 온도로 인해 스트리퍼로 투입이 되지 못하는 것을 압축기를 이용해 투입 가능한 압력 및 온도 조건이 되도록 하였다. 또한, 공정에서 최종적으로 회수된 용수를 재활용하여 열 교환기에서 모노머를 응축하기 위해 투입되는 냉각수를 대신 하도록 하고, 모노머가 충분히 응축될 수 있도록 공정의 전체적인 운전 압력과 decanter의 운전 압력을 변경하였다.

중합공정 내 잔류 모노머 회수 공정에서 발생하는 열을 회수하고, 용수를 재활용 하여, 유틸리티 사용량 절감을 통해 제품의 원가를 개선할 수 있도록 공정을 새롭게 설계하였다.

2. 기존 공정 분석

기존 공정의 공정 흐름도를 Fig. 3에 주요 스트림의 열 및 물질 수지를 Table 1에 보였다.

Table 1에서 엔탈피는 Aspen Plus® 방식을 따라 25 °C, 1 bar에서의 원소를 엔탈피 = 0의 기준 상태로 설정하고 계산하였다.

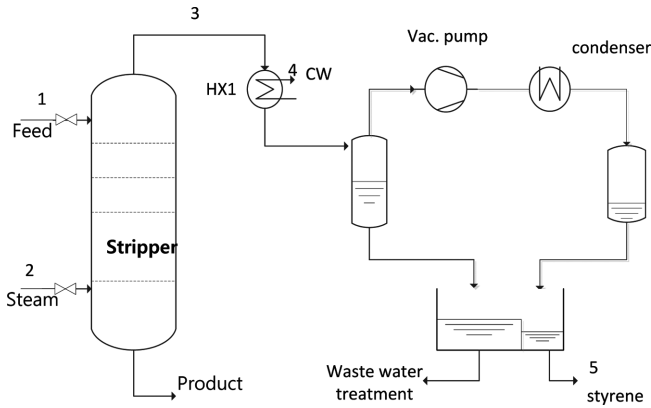


Fig. 3. Process flow diagram of the existing styrene monomer recovery process.

2-1. 스트리퍼 공정

스트리퍼는 그 설계 및 운전방식의 결정에 따라, 모노머 회수 공정 전체의 효율이 결정되는 핵심 설비이다. 현재 운영 중인 스트리퍼는 스팀 스트리핑 방식을 이용한 것이다. 스트리퍼의 설계 및 운전에 대한 연구는 비교적 많이 발표되어 있으며, 본 공정의 스트리퍼 및 내부 설계는 선행 연구를 참고하여 실시하였다[3,4].

현재 공정에서 운영 중인 스트리퍼는 상부로 투입되는 생성물과 하부로 투입되는 스팀이 스트리퍼 내의 트레이에서 향류로 접촉하며 분리된다. 일반적인 종류와 유사한 면이 있지만, 환류와 재비기가 없는 단순한 형태이다. 스트리퍼의 규격, 단의 종류 등 상세한 설계는 처리량 및 물질 조성 등에 맞추어 설계되었으나, 본 논문에서는 상세 설계사양은 제시하지 않도록 한다.

2-1-1. 투입 물질 특성

스트리퍼로 투입되는 feed는 반응기에서 중합된 라텍스 형태의 폴리머, 물, 미반응 모노머 및 유화제를 포함한 미량의 첨가제의 혼합물이다. 20 °C 스티렌의 물에 대한 용해도는 0.03 wt%로 물과 모노머는 사실상 혼합이 일어나지 않지만 유화제 등의 영향으로 기액 평형이 영향을 받게 된다.

2-1-2. 스트리퍼 물질 및 열 흐름

스트리퍼의 상부로 투입되는 생성물의 조성은 Table 1과 같으며, 투입 조성 중 라텍스와 함께 하부로 회수되는 물은 스트리퍼 이후 탈수, 건조를 통해 1 wt% 이하로 제거된다. 하부로 투입되는 스팀은 135 °C, 1.96 bar의 저압 스팀으로, 모노머 회수 및 재사용에 따른 경제성과 스팀 비용을 고려하여 현재 스티렌 모노머 190 kg/h의 회수를 위하여 스팀 3,500 kg/h이 투입된다. 스트리핑 스팀은 스트리

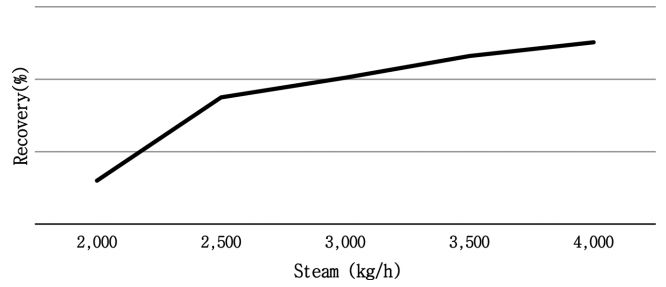


Fig. 4. Monomer recovery rate depending on the amount of steam injection; Company experimental data.

퍼 내 스티렌 모노머의 분압을 낮추어 모노머 증발을 유도한다. 스팀 투입량이 증가할 수록 모노머의 회수율이 증가하지만, Fig. 4와 같이 일정량 이후는 회수율 증가율이 낮아지는 것으로 관찰된다. 현재 스팀 투입량은 이러한 실험결과를 반영하여 결정되었다.

스트리퍼 feed 스트림과 하부 배출 스트림의 온도가 거의 동일하므로 라텍스를 제외하고 물과 모노머 그리고 스팀 엔탈피의 스트리퍼 유입량과 배출량을 비교한 결과 99.2%의 일치율을 보였다. 이로부터 스트리퍼에서의 열 손실을 무시할 만한 것으로 간주하여, 개선 공정에서의 열 수지를 계산하였다.

2-2. 열 교환기 및 decanter 운전

스트리퍼 상부로 스팀과 함께 배출된 모노머는 증기상태이며, 스팀과의 분리를 위해서는 응축이 필요하다. 기체로 배출된 스팀과 모노머는 주 응축기에서 99% 이상 응축시키며, 이를 위해 18 °C의 냉각수를 60,000 kg/h의 유량으로 열 교환기에 공급한다. Fig. 5에 주 응축기인 HX1 내에서의 T-Q 선도를 보였다. 사용된 냉각수는 56 °C까지 상승하며 온도가 높아 현재 폐수로 최종 처리 된다. 온도 상승을 낮추어 냉각 후 재사용 하려면 유량이 많이 요구되는 문제를 안고 있다.

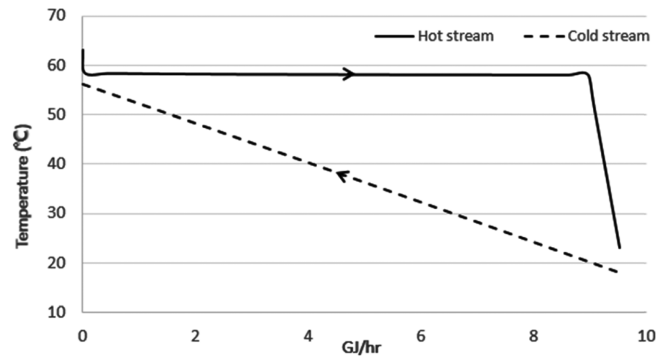


Fig. 5. Heat exchanger T-Q curve by using recovery water.

Table 1. Heat and mass balance of the selected streams in Fig. 3

Stream	1	2	3	4	5	
Material (kmol/h)	Water	1,087.7	194.2	208.1	-	0.0
	Styrene	3.4	-	1.8	-	1.8
Utility (ton/h)	CW	-	-	-	60.0	-
	Temp (°C)	65.0	135.0	63.0	18.0	23.0
Pressure (bara)	2.94	1.96	0.18	-	1.01	
Vapor Fraction	0	1	1	0	0	
Enthalpy (GJ/h)	-	-46.256	-49.790	-	-	

열 교환기에서 응축된 물과 모노머는 decanter에서 비중차를 이용해 분리된다. 이렇게 최종적으로 회수된 모노머는 다음 중합반응에 재사용 하기 위해 이송되며, Fig. 3과 같이 분리된 물도 공장 내 폐수 처리시설로 보내져 최종 처리된다.

3. 개선 공정 설계

현재 공정에 대한 분석결과를 바탕으로, Fig. 6과 같이 decanter에서 회수된 물을 이용하여 주 응축기 HX1 에서 응축열을 스팀으로 회수하고, 이 스팀을 스트리퍼에 공급함으로써, 유틸리티(스팀, 냉각수) 사용을 절감하는 공정을 제안하였다. 새롭게 제안된 공정은 모사를 통해 적용 가능여부와 개선효과를 확인하였다.

3-1. 응축열 회수와 응수 재활용

Decanter에서 회수된 물을 이용해 스트리퍼 배출 증기를 응축시킨다면, 냉각수 공급을 획기적으로 절감할 수 있다. 또한 회수된 잠열을 스트리핑 에너지로 사용한다면 유틸리티로 공급해야 하는 스트리핑 스팀량을 절감시킬 수 있다. 이러한 목적이 만족 되도록 공정을 개선하기로 하고, 다음 사항들을 고려하였다.

첫째, 스트림 5은 스트림 3 보다 온도가 낮아야 하므로 추가적인

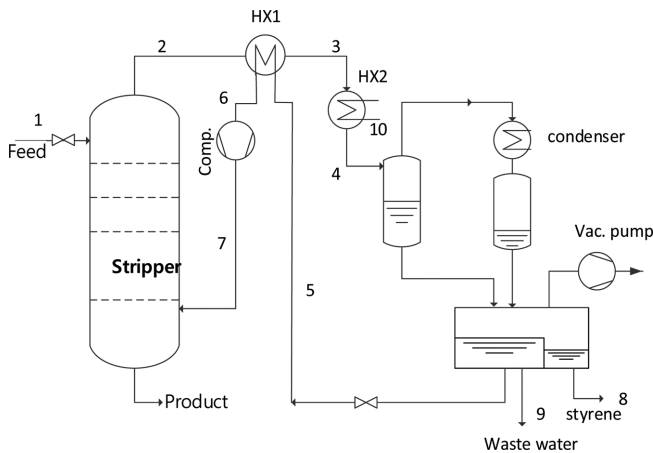


Fig. 6. The improved monomer recovery with heat integration.

냉각이 필요하다. 이를 위해 HX2 를 설치한다.

둘째, HX1에서 최소 온도차 조건을 유지하기 위한 스트림 5의 온도가 너무 낮지 않도록 스트림 3은 과냉 되지 않은 포화 액체 상태로 설정한다.

셋째, 스트림 6이 스트림 2, 3과 적절한 온도차를 유지하며 포화 증기가 되도록 스트림 5, 6의 압력은 스트리퍼 압력 보다 낮게 유지한다. 이것을 위해 decanter 후단에 밸브를 설치하여 압력 강하를 유도하며, 스트림 6의 저압 증기를 스트리퍼에 투입할 수 있도록 압축기를 설치한다.

넷째, 스트리퍼의 압력은 기존과 같이 0.18 bar를 유지한다. 이

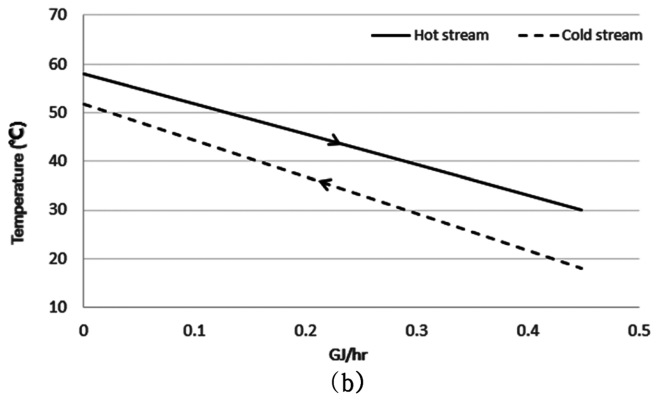
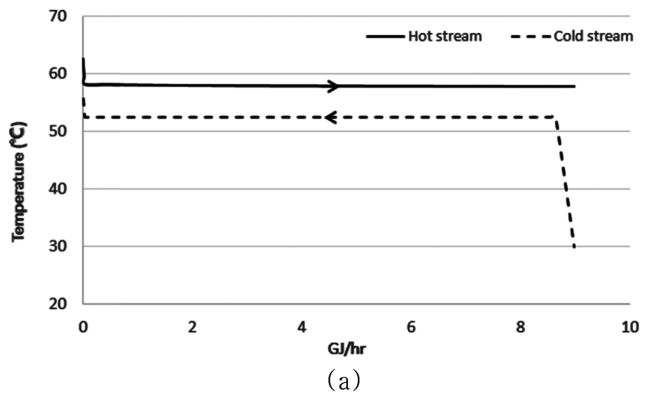


Fig. 7. T-Q curve for (a) HX1 (b) HX2.

Table 2. Heat and mass balance of the selected streams in Fig. 6

Stream		1	2	3	4	5
Material (kmol/hr)	Water	1,087.7	208.1	208.1	208.1	201.1
	Styrene	3.4	1.8	1.8	1.8	0.0
Utility (ton/hr)	CW					
Temp (°C)		65.0	62.7	57.9	30.0	30.0
Pressure (bara)		2.94	0.18	0.18	0.18	0.14
Vapor Fraction		0	1	0	0	0
Enthalpy (GJ/h)		-	-49.790	-58.765	-59.213	-57.387
Stream		6	7	8	9	10
Material (kmol/hr)	Water	201.0	201.0	0.036	7.0	
	Styrene	0.0	0.0	1.8	0.0	
Utility (ton/hr)	CW					3.2
Temp (°C)		55.8	84.9	30.0	30.0	18
Pressure (bara)		0.14	0.18	0.18	0.18	4.41
Vapor Fraction		1	1	0	0	0
Enthalpy (GJ/h)		-48.412	-48.214	0.172	-1.998	-50.857

Table 3. Comparison of utility requirement and cost for the existing and improved processes

	Existing		Improved	
	Amount	Cost (10 ⁶ won/yr)	Amount	Cost (10 ⁶ won/yr)
Steam (ton/h)	3.5	1,042.4	0	0
CW (ton/h)	60.0	233.9	3.2	12.5
Electricity (kW)	11.0	9.9	65.9	59.5
Total		1286.2		72

Unit price (won/ton, won/kWh): steam: 34,000, CW: 445.0, electricity: 103.0

압력에 의해 스트리퍼 운전온도가 결정되며, 이 온도는 스트리퍼 내 라텍스의 변형을 유발하지 않도록 설정된 것이기 때문이다. 스트림 5, 6의 압력이 0.18 bar 보다 더 낮아야 하며, 이 압력은 HX1에서의 최소 온도 차가 6 °C가 되도록 결정하였다.

다섯째, HX1에서 열교환이 이루어진 저압 증기 스트림 6이 추가 가열 없이 압축기로 공급될 수 있도록 decanter에서 페수로 처리되는 유량을 결정하였다.

3-2. 열 교환기 T-Q 선도 계산 및 운전조건 결정

스트림 3을 기존 공정과 같이 0.18 bar, 58 °C로 유지한 상태에서, 스트림 5, 6의 압력을 0.14 bar로 설정한 경우의 HX1의 T-Q 선도를 Fig. 7(a)에 보였다. 0.14 bar에서 최소 온도 차가 6 °C가 성취되며 이 값을 운전 압력으로 설정하였다.

Fig. 7(b)에 보인 것과 같이, HX2는 물-스티렌 혼합물을 57.9 °C에서 30 °C까지 냉각시키며, 이를 위해 기존 공정과 같이 18 °C 냉각수를 사용하였다. HX2에서 최소 온도 차를 6 °C로 고려하여 적은 양의 유량의 냉각수가 사용되도록 하였다.

4. 결과 및 고찰

Table 2에 제안된 공정의 각 공정 스트림의 열 및 물질수지를 보였다. 우선 외부에서 공급하던 스팀이 전혀 사용되지 않고 열 통합에 의해 필요한 스팀을 자체로 생산하여 사용함을 할 수 있다. 기존 공정에 비하여 냉각수의 사용량도 현저히 줄었으나, 압축기 가동을 위한 전기 사용이 필요하다. 설비는 HX2및 압축기 설치가 신규로 요구되었고 이 때 압축기의 효율은 72%로 가정하였다.

Table 3에 보인 것과 같이 개선된 공정은 기존의 공정과 비교하여, 기존 공정에서 요구되던 스팀 공급이 필요하지 않게 되었고, 용수 사용은 5% 수준까지 절감했다. 대신 신규 압축기에서의 전력비를 고려해 주었고 사용량 절감에 따라 유틸리티 비용 감소효과는 연간 약 12.0억원이다. 비용 개선효과의 계산을 위해서 사용된 각 유틸리티의 단가는 16년 3월 기준 공장에서 실제 적용되는 단가를 사용하였다.

그리고 직접적인 유틸리티 절감 효과 외에, Table 4에 보인 것과 같이 용수 재활용으로 인한 페수 처리 비용 절감이 약 2.2억원, 냉각수 공급을 위한 펌프 사용 전력비 절감효과 약 0.1억원으로, 연간 2.3억원의 추가적인 경비 절감효과도 기대할 수 있다.

기존 공정의 HX1은 스팀-냉각수 열 교환이 이루어지는 것에 비해 개선된 공정에서는 스팀-스팀의 열 교환이 이루어지므로 열 교

환면적을 줄일 수 있어 열 교환기 투자비용을 절감할 수 있을 것으로 보이지만 본 연구에서 설치 및 투자비용에 대한 자세한 기술은 하지 않도록 한다.

유틸리티 비용 등 제조비용의 절감과 함께 개선된 공정에서 중요한 것은 기존 공정과 동일한 모노머 회수율을 유지하는 것인데, 스트리퍼 운전조건은 기존과 같으므로 모노머 회수율에는 변화가 없다.

개선 공정은 기존 공정에서보다 냉각에 필요한 용수의 사용량을 획기적으로 줄일 수 있다. 더 나아가 HX2에서 냉각수 유량을 늘리는 대신 냉각 부하를 줄인다면 냉각 회수 및 냉각 후 재사용도 가능할 수 있을 것이다. 냉각수 재사용이 이루어 질 경우 냉각수의 지속적인 공급이 필요 없게 되며 대신 냉각 탑의 설비와 전력 유틸리티 비용이 추가로 요구된다.

5. 결 론

제품의 원가개선을 목표로 ABS 중합공정 중 스티렌 모노머 회수공정의 유틸리티 사용량을 획기적으로 절감할 수 있는 공정 개선을 수행하였다. 공정 내에서 발생하는 용수와 열의 회수 및 재사용을 통해 기존의 품질 수준을 유지하면서 유틸리티 사용을 절감할 수 있는 방안을 찾았으며, 중요한 몇 가지 결과는 다음과 같다.

- (1) 스트리핑 과정에서 최종 회수된 물을 스트리퍼에서 배출된 증기의 응축 과정에 재사용함으로써, 기존에 사용되었던 냉각수의 사용을 절감했다.
- (2) 증기의 응축 과정에서 응축열을 회수해서 만들어진 스팀을 스트리퍼에 재사용 하여, 스팀의 추가 공급 없이 운전할 수 있도록 했다.
- (3) 공정 개선 전, 후의 모노머 회수율은 큰 차이 없이, 동일한 수준을 유지했다.

이러한 유틸리티 사용량 감소를 통해, 스티렌 모노머 회수 공정에서 사용되는 유틸리티 비용이 기존 대비 6% 수준으로 절감되었으며, Excel을 이용한 공정 모사를 통해 전체적인 효과와 실제 공정에서의 적용 가능여부를 확인하였다.

감 사

본 연구는 롯데첨단소재의 실험 데이터 및 설비자료 지원을 받아 진행되었으며, 이에 감사 드립니다.

References

1. Brown, Wayne, et al., "Introducing Slurry Into Steam Stripping Vessel Chamber to Vaporize Dilute and Some Water, Introducing

Table 4. Additional cost saving in the improved process

10 ⁶ won/yr	Waste water treatment	Water pump	Total
Cost saving	216.7	10.2	226.9

- Steam to Vaporize Water, Removing Vapor and Slurry," U.S. Patent No.6,358,404(1992).
- Xu Songlin, Jose Espinosa, Hector E. Salomone and Oscar A. Iribarren, "Operation of a Batch Stripping Distillation Column", *Chinese J. of Chem. Eng.*, **9**(2), 141-144(2001).
 - Yng-Long Hwang, Gerge E. Keller II, and James D. Olsson, "Steam Stripping for Removal of Organic Pollutants from Water. 1. Stripping Effectiveness and Stripper Design," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **31**(7), 1753-1759(1992).
 - Yng-Long Hwang, Gerge E. Keller II, and James D. Olsson, "Steam Stripping for Removal of Organic Pollutants from Water. 2.VLE Data," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **31**(7), 1759-1768(1992).
 - Leland M. Vane, Franklin R Alvarez, "Membrane-assisted Vapor Stripping : Energy Efficient Hybrid Distillation-vapor Permeation Process for Alcohol-water Separation," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **83**, 1275-1287(2008).
 - Jacobs, Marc L., D. E. Gottschlich, and R. W. Baker, "Monomer Recovery in Polyolefin Plants," *Petroleum Technology Quarterly*, 132-135(1999).
 - P. Bernardo, E. Drioli, "Membrane Gas Separation Progresses for Process Intensification Strategy in the Petrochemical Industry," *Petroleum Chemistry*, **50**(4), 271-282(2010).