

SF₆ 가스 회수 공정들의 특성 연구

조 훈, 우대식, 최유미, 한명완*

충남대학교 공과대학 화학공학과
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220번지

(2011년 9월 18일 접수; 2011년 10월 21일 1차 수정본 접수; 2011년 10월 24일 2차 수정본 접수; 2011년 10월 24일 채택)

Characteristics of SF₆ Gas Recycling Processes

Hoon Cho, Daesik Woo, Yumi Choi, and Myungwan Han*

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University,
220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

(Received for review September 18, 2011; 1st Revision received October 21, 2011; 2st Revision received October 24, 2011; Accepted October 24, 2011)

요 약

SF₆가스는 지구 온난화 가스로 알려져 있다. SF₆가스의 지구온난화 기능은 이산화탄소에 비하여 22,000배 이다. SF₆가스 회수기술은 환경 및 경제적 측면에서 주요한 기술이다. 본 연구에서는 SF₆가스를 현장에서 용이하게 회수할 수 있는 여러 공정들로서 액화공정, 결정화 공정, 증류 공정에 대하여 연구하였다. 이들 공정들을 Aspen plus를 이용하여 공정 모사 및 최적화를 행하였다. 제품의 규격과 회수율을 만족하면서 에너지 소모량을 최소화하도록 최적화 문제를 구성하였다. 이 최적화 결과들을 바탕으로 공정성능들을 비교하였다. 각 공정변수들이 공정 성능에 미치는 영향을 조사하였고, 제품의 순도와 회수율의 변화에 따른 최적 조업조건의 변화를 살펴보았다.

주제어 : SF₆, 액화 공정, 결정화 공정, 증류 공정

Abstract : SF₆ gas is well known as a global warming gas. Global warming potential of SF₆ gas is 22,000 times higher than that of CO₂. Recycling of SF₆ gas is an essential technology for the sake of the environment and the economy. The recovery processes of SF₆ gas studied in this work were liquefaction, distillation, and crystallization processes because these processes were thought to be easily carried to the fields for recycling waste SF₆ gas. The processes were simulated and optimized using Aspen plus. The optimization problems were formulated to minimize energy consumption with satisfying product specification and desired recovery. The performance of the processes was compared based on the optimization results. Effects of major process variables on the recovery performance were investigated and optimal operation guide for changing product specification and product recovery was provided.

Keywords : SF₆, Liquefaction process, Distillation process, Crystallization process

1. 서 론

최근 환경에 대한 관심이 극대화 되어 세계 각국에서 이산화탄소 및 환경오염물질 배출을 줄이기 위한 노력이 끊임없이 이어져 오고 있다. 국내에서도 저탄소 녹색성장을 목표로 환경오염물질 배출에 대한 규제가 엄격해 지고 있으며, 이와 더불어 환경오염물질 배출 방지를 위한 여러 기술이 개발되고 있다.

인간 활동의 환경에 대한 영향은 최근에 이르러 전 세계적으로 커다란 관심의 대상이 되어 있으며, 특히 대기중의 온실가

스 농도의 증가에 기인하는 잠재적인 기후 변화 효과가 지구환경 측면에서 크게 주목 받고 있다[1]. 이들 가스 중의 하나가 SF₆이다. SF₆는 지구온난화 지수(Global Warming Potential, GWP)가 CO₂의 약 22,000배이고 매우 고가인 온실 가스이다. 따라서 SF₆가스를 대기 중에 배출하지 않고 재활용하는 것은 환경적으로 또한 경제적으로 중요한 일이다.

SF₆는 전기 절연용으로 전력 산업용, 회로 차단용, 개폐기, 소형 배전소에서 주로 사용되고 있으며 비 절연용으로는 반도체나 LCD, 타이어 충전 가스, 누출 검사용으로 사용되고 있다. SF₆ 가스는 그 자체가 안전할 뿐만 아니라 무해한 기체이고, 물리적으로 매우 안정하며 무독성이다[2,3]. 또한 불활성 가사이면서 높은 절연성과 열적 안정성이 높은 물질이나 최근 지구환경보호에 대한 의식이 높아지면서 이 가스가 극히 온실 효과가

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mwhan@cnu.ac.kr

높은 물질임이 알려져 그 사용에 대해 전 세계적으로 규제되는 경향을 보이고 있다[4]. 이러한 시점에서 우리나라도 SF₆ gas recycling system 기술을 개발하여 SF₆을 효율적이고 경제적이면서 친환경적으로 분리할 수 있는 최적의 공정을 개발해야 한다.

본 연구에서는 SF₆가스를 회수할 수 있는 여러 공정들에 대하여 Aspen plus를 이용하여 모사하였다. 증류 공정, 결정화 공정, 액화 공정에 대하여 모사를 행하였고, 장단점들을 살펴보았다. 각 공정들은 폐 SF₆가스를 정제하는 것을 목적으로 하며, 정제할 SF₆는 기체와 액체로 이루어져 있다. 각 공정의 변수들을 조절하여 액체 또는 고체로 회수하였으며, 결정화 공정을 제외한 공정들은 액체로 회수하였다.

각 공정 변수들이 공정 성능에 미치는 영향을 살펴보고, Aspen plus의 최적화 기능을 이용하여 최적화된 공정을 바탕으로 공정 성능을 비교하였다.

2. SF₆ 가스 처리 공정

중전기에서 사용되는 SF₆가스의 처리 방법에는 재이용과 폐기(분해처리)의 방법이 있다. 중전기에서 회수된 SF₆가스는 재이용할 수 있는 범위의 순도를 갖는 것은 현장에서 간단한 분리 정제공정을 거쳐 바로 재충전하여 사용이 가능하다. 현장에서 바로 처리할 수 없는 경우의 회수 가스는 현장이 아닌 보다 복잡한 제조 공정으로 이송 후 불순물을 제거하고 이를 다시 재충전할 수 있도록 한다. 재사용이 불가능할 경우에는 소각 및 촉매 분해 방법을 통해 안전하게 분해 처리되어 대기로 방출됨으로써 폐기처리 된다. SF₆를 정제하는 기술에는 저온 가압 분별 증류, 흡착 정제 공정, 막 정제 공정, 액화 공정, 증류 공정 등이 있으며, Table 1에 전반적으로 적용 가능한 기술들에 대해서 나타내었다. 현장에서 바로 처리할 수 있는 것으로 보이는 액화 공정, 결정화 공정, 증류 공정, 3가지 공정에 대하여 연구하였다. 또한 SF₆가스에 포함되는 불순물을 정제하는 데 필요한 불순물들의 물성을 Table 2에 나타내었다. 처리할 SF₆가스의 조성과 조건을 Table 3에 나타내었다. 주입되는 원료의 조성은 SF₆ 0.9, N₂ 0.081, O₂ 0.0189, CF₄ 0.001 몰 분율의 조성을 가진 것으로, 즉 SF₆가스에 불순물로 Air와 CF₄가 들어있다고 가정하였다[5]. 정제할 SF₆는 기체와 액체의 7 대 3의 비로 이루어져 있다. 이와 같은 조건의

Table 2. Property comparison of impurities

Properties	SF ₆	CF ₄	N ₂
Boiling point (°C)	-63.7 (Sublimation)	-128.0	-195.8
Melting point (°C)	-50.8	-186.8	-210.01
Relative density, gas (Air = 1)	5.114	3.05	0.986
Molecular diameter, A (Kinetic diameter)	5.3 (5.5)	4.8 (4.5)	(3.64)
Bond length, A	S-F (1.561)	C-F (1.326)	N-N (1.0977)
Solubility in water	0.00002785% by weight	0.0015% by weight	0.0008512% by weight

Table 3. Specification of SF₆ gas (feed)

Parameter	Parameter value (Input)
Temperature	250 K
Pressure	10 bar
Flow rate	1 kmol/s
Mole frac (SF ₆)	0.9
Mole frac (N ₂)	0.0801
Mole frac (CF ₄)	0.001
Mole frac (O ₂)	0.0189
Liquid frac.	0.3
Vapor frac.	0.7

SF₆ 가스를 3가지 공정을 사용하여 처리하도록 하였다. 모든 공정은 Aspen plus를 이용하여 모사하였고, 열역학 모델은 Peng-Robinson 식을 이용하였다.

액화 공정의 경우, 각 가스들의 응축점이 다른 것을 이용하여 SF₆가스를 정제할 수 있다. Figure 1은 SF₆, N₂, O₂, CF₄의 증기압을 나타내었다. 10 bar로 압축한 경우 약 265 K 온도 이하에서 액화되는 것을 볼 수 있다. CF₄의 경우 10 bar로 한 경우 193 K 정도의 온도에서 액화되는 것을 볼 수 있으며 N₂와 O₂는 상당히 낮은 온도에서 액화되는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 증기압 차를 이용하여 액화 공정에서 SF₆가 다른 기체에 비하여 보다 많은 분율이 액화되므로 SF₆의 분리에 액화 공정을 사용할 수 있다.

Table 1. Characteristics and operation of applicable technology

Unit operation	Operation	Process characteristics
Low pressure fractional distillation	Boiling point difference	Universality
Crystallization purification process	Melting point difference	Universality
Adsorption purification process	Adsorption	Universality
Absorption purification process	Amount of absorption	Universality
Ultra-centrifugal separation	Density	Rarity
Membrane purification process	Absorption, Molecular size, Adsorption	Universality, Low maintenance costs
Chromatography	Affinity, Residence time	Extraneous material is required
Getter	Chemical reaction	Using the final stage, High purity and yield, High cost

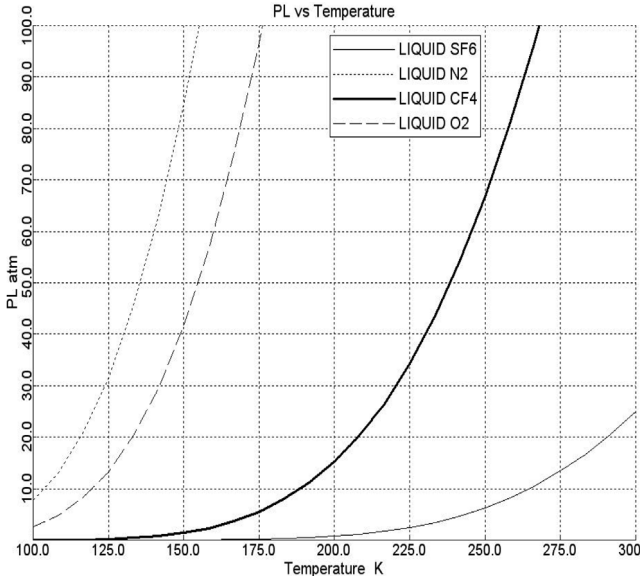


Figure 1. Vapor pressure curve.

결정화 공정은 용해도 차를 이용하여, SF₆가스를 고체 결정으로 회수한다. 결정화 공정은 화학 관련 산업에 있어서 필수 불가결한 분리 및 정제 공정으로서, 제품의 70% 이상이 결정 형태로 이루어져 있다고 알려져 있다. 이 공정은 액화 공정과 달리 SF₆가스를 고체로 생성하기 위해 액화 공정에 비해 낮은 온도를 유지한다.

증류 공정은 혼합물을 분리하기 위한 방법으로 석유 및 화학 공정 산업에서 널리 쓰이고 있다. 영리적인 목적의 증류는 석유를 증류하여 휘발유, 경유, 등유와 같은 여러 종류의 연료로 분리하는 데에서부터, 공기를 증류하여 아르곤과 같은 특수한 기체를 얻는 데 이르기까지 광범위하게 사용된다. 탑하부로 SF₆가스를 액체로 생성하며, 공정 조건들은 다른 공정들에 비해 변화를 줄 수 있는 변수들이 상대적으로 많으며, 환류비(reflux ratio)와 탑상 유속(distillate rate)을 공정 변수로 정하였다. 또한 SF₆ 가스 회수의 경우 증류에 의해 쉽게 분리되기 때문에 증류탑의 단수를 1단으로 하였다. 운전압력은 Figure 1을 참고하여 10 bar로 정하였다.

3. 공정 변수들의 영향

액화 공정, 결정화 공정, 증류 공정의 공정 변수들이 각 공정의 순도(purity), 회수율(recovery), 에너지 소모량(energy consumption, Q)에 미치는 영향을 알아보았다.

Figure 2는 액화 공정에서 온도, 압력, 에너지 소모량의 상관 관계를 나타내었다. SF₆를 액화시키는데 온도가 낮을수록 에너지 소모량이 증가하였다. 그러나 압력에 대해서는 에너지 소모량의 변화가 적었다. 그러나 압력 변화의 경우 약 5 bar에서 가장 적은 에너지 소모량을 나타내었다. Figure 3은 액화 공정에서 온도, 압력, 회수율의 상관 관계를 나타내었다. 온도가 높을수록 회수율은 감소하며, 압력이 높을수록 회수율이 증가하였다. 이는 Figure 2의 에너지 소모량에 대한 결과

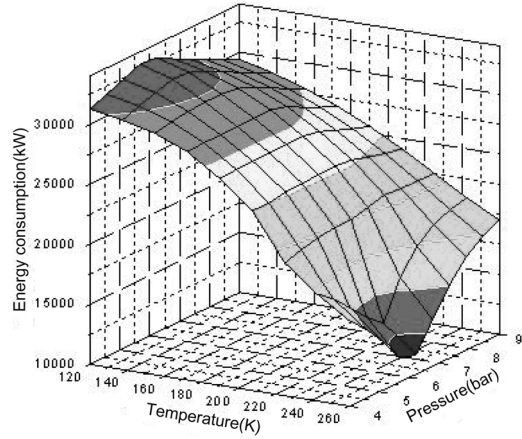


Figure 2. Liquefaction process: relationship between energy consumption, temperature and pressure.

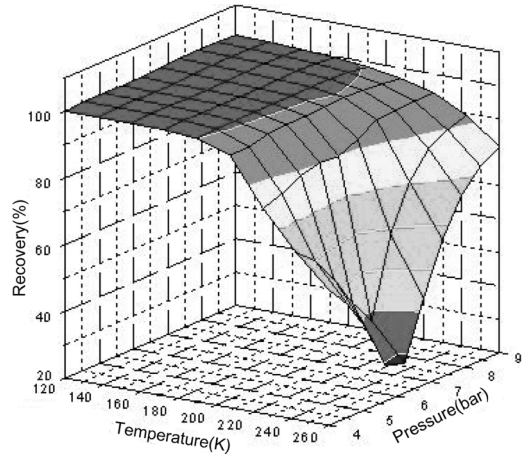


Figure 3. Liquefaction process: relationship between recovery, temperature and pressure.

와 비슷한 경향을 보였다. SF₆ 가스의 응축점은 -63.7 °C 온도가 매우 낮기 때문에 온도가 낮을수록 SF₆가스의 응축점과 가까워지며 회수율은 증가하게 된다. 또한 압력의 영향보다 온도의 영향을 더 많이 받으므로 압력은 저압으로 유지시킨 상태에서 온도 변화를 이용하여 회수율을 높이는 것이 적절하다. Figure 4는 액화 공정에서 온도, 압력, 순도의 상관 관계를 나타내었다. 높은 순도의 값을 얻기 위해서 온도는 높을수록 그리고 압력이 낮을수록 좋다. 또한 순도는 압력 변화보다 온도 변화에 더 민감한 경향을 나타내었다. SF₆가스를 회수하기 위해서는 온도를 낮추어 액화하는 과정이 필요하기 때문에 압력보다는 온도에 더 민감한 반응을 보였다. Figure 5는 결정화 공정에 대하여 온도를 190 K로 고정하였으며, 압력 변화에 따른 순도, 회수율, 에너지 소모량 변화를 나타내었다. 결정화 공정에서의 생성물은 고체상으로 존재하므로 압력 변화에 대하여 순도는 항상 100%를 만족하였다. 또한 압력 변화가 4~10 bar의 변화에 대해서 회수율과 에너지 소모량은 증가하였다. 그러나 회수율의 경우 압력 변화에 대하여 회수율의 변화는 99.11~99.6%로 나타났다. 그러므로 에너지 소모량에 비

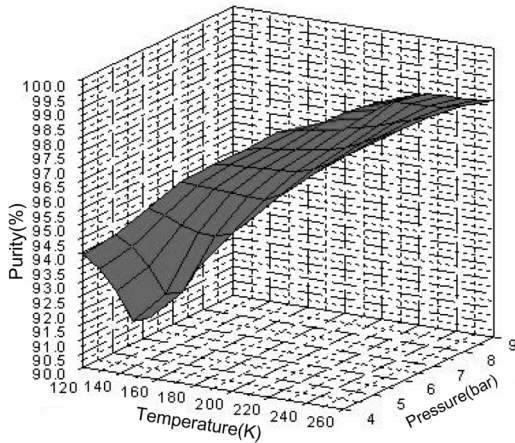


Figure 4. Liquefaction process: relationship between purity, temperature and pressure.

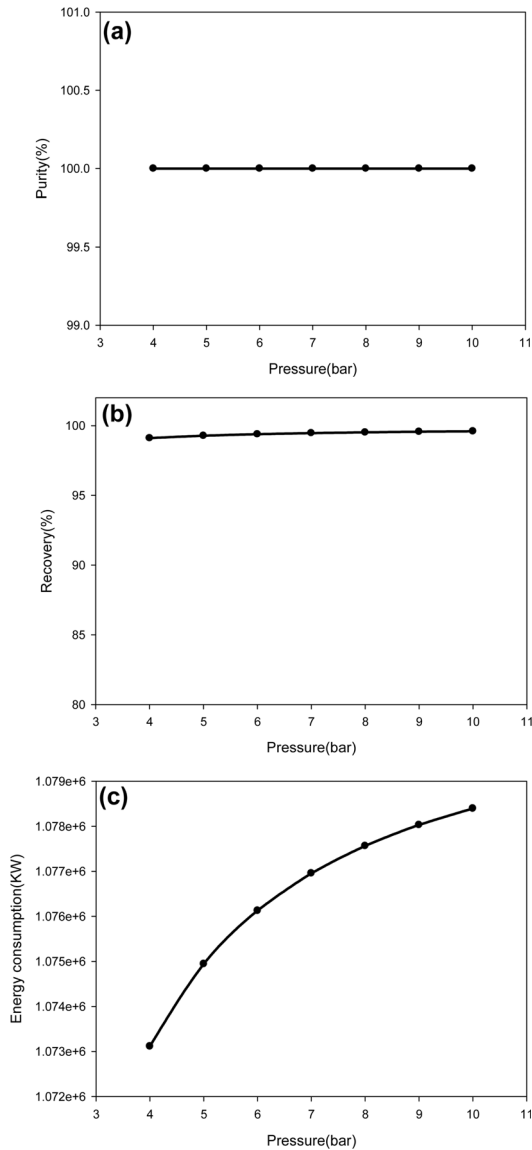


Figure 5. Crystallization process: (a) purity vs. pressure, (b) recovery vs. pressure, (c) energy consumption vs. pressure.

해 회수율 변화의 폭이 작은 것을 알 수 있다. Figure 6은 결정화 공정에 대하여 압력을 10 bar로 고정하였으며, 온도 변화에 따른 순도, 회수율, 에너지 소모량 변화를 나타내었다. 온도 변화에 대해서도 순도는 100%로 변화를 보이지 않았으며, 온도가 낮게 할수록 회수율과 에너지 소모량은 증가하였다. 회수율과 에너지 소모량은 압력보다 온도에 민감하게 변화하였다. Figure 7은 증류 공정에 대하여 환류비를 1.5로 고정시키고, 탑상 유속의 변화를 주었을 때 순도, 회수율, 에너지 소모량 변화를 나타내었다. 탑상 유속을 증가시킬수록 회수율은 감소하였으며, 에너지 소모량은 증가하였다. 그러나 순도의 경우 변화는 미미하게 나타났다. 이는 탑상 유속이 증가하면 탑상으로 생성되는 물질의 양이 커지므로 에너지 소모량은 증가하고, 회수율도 감소하기 때문이다. Figure 8은 증류 공정에 대하여 탑상 유속을 0.28 kmol/s로 고정시키고 환류비 변화

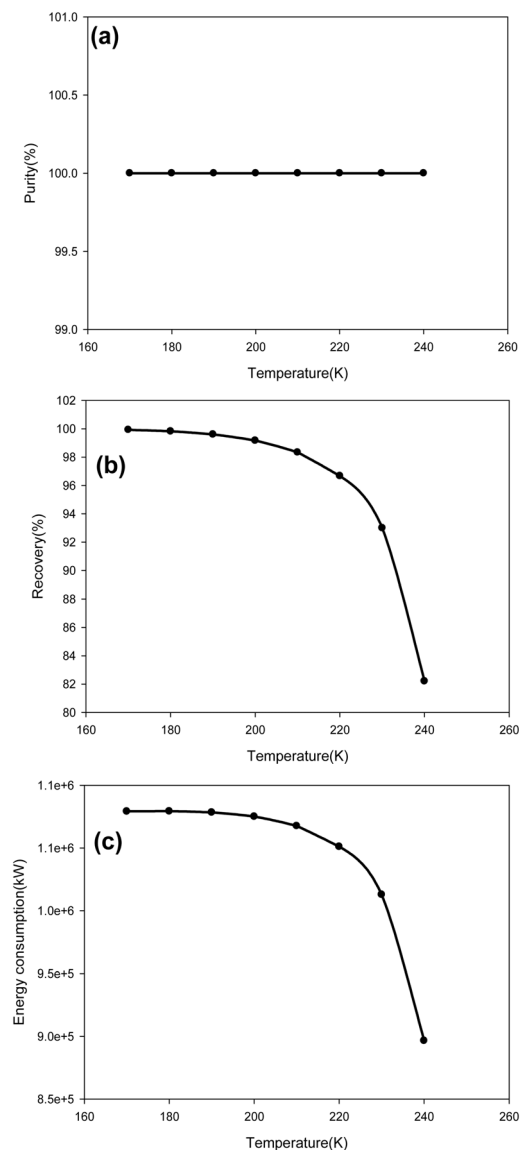


Figure 6. Crystallization process: (a) purity vs. temperature, (b) recovery vs. temperature, (c) energy consumption vs. temperature.

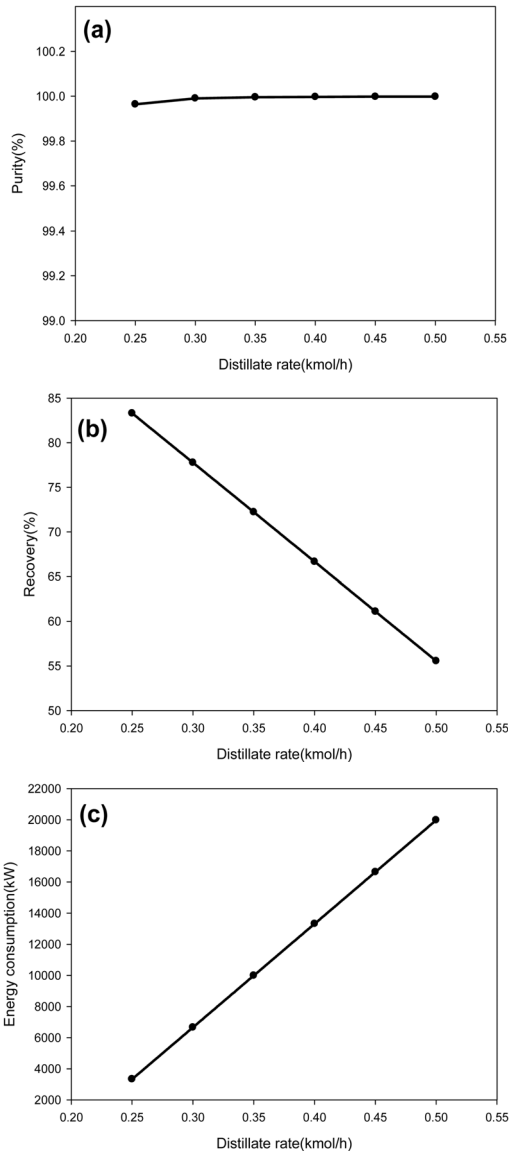


Figure 7. Distillation process: (a) purity vs. distillate rate, (b) recovery vs. distillate rate, (c) energy consumption vs. distillate rate.

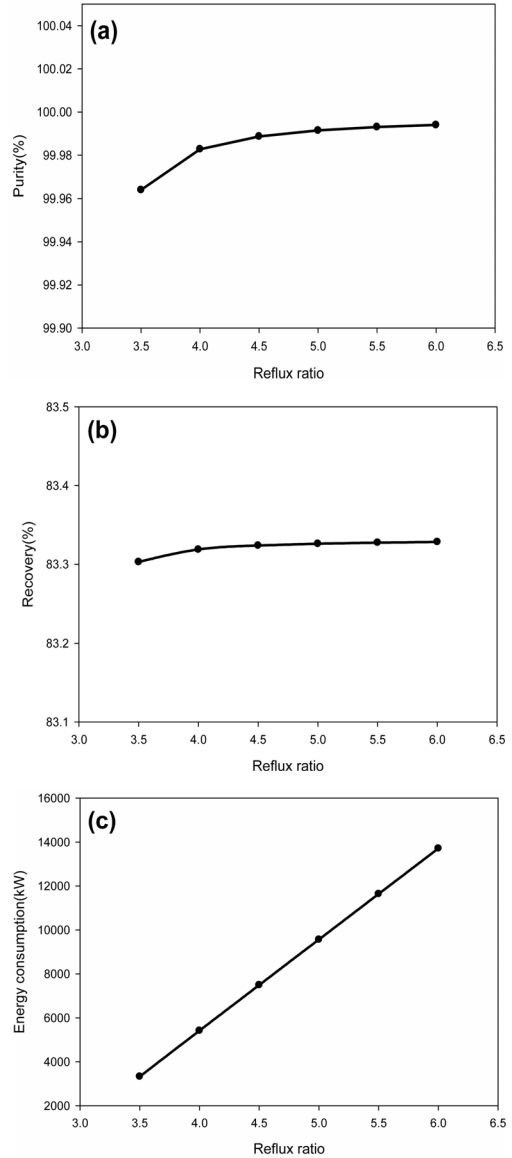


Figure 8. Distillation process: (a) purity vs. reflux ratio, (b) recovery vs. reflux ratio, (c) energy consumption vs. reflux ratio.

에 따른 순도, 회수율, 에너지 소모량 변화를 나타내었다. 환류비가 증가할수록 회수율과 순도가 증가하였으며, 에너지 소모량도 증가하였다. 환류비는 환류와 탑 상 제품의 비로서 환류비가 증가할수록 순도, 회수율, 에너지 소모량이 증가하였다.

4. 최적화

최적화는 많은 미결정 변수들에 대한 최적화 알고리즘을 이용하여 결정 변수 혹은 공정의 최적의 설정값(set point)을 찾아내는 것이다. 이는 공정 모델을 개선한 후 공정의 제약 조건과 상위 단계의 경제성을 고려하여 최적의 효율을 얻을 수 있는 조업 조건을 제시하는 것이다. 일반적인 최적화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

Minimize $f(x)$

Subject to

$c(x) = 0$ (equality constraints)

$g(x) \leq 0$ (inequality constraints)

$f(x)$ 는 목적함수이며 공정으로부터 얻을 수 있는 이익을 말한다. 등식 제약 조건인 $c(x)$ 는 수식 기반 모델로서 물질 수지식, 에너지 수지식, 열역학적 관계식, 물리적 제약식 및 도함수를 의미한다. $g(x)$ 는 공정의 제약 조건식 혹은 제약 조건을 의미한다.

공정을 최적화 하는 것은 목적 함수와 그에 따른 제약 조건을 이용하여 목적 함수를 극대화하는 조업 조건 혹은 설계 조

건을 찾는 것이다. 공정 이득을 대변하는 목적 함수는 일반적으로 생산량, 운전 비용, 에너지 소모량, 유틸리티 사용량 등으로 구성된다. 최적화 계산은 실제 공정 내용과 거의 근접하게 계산해주는 모델을 통하여 얻을 수 있다. 이를 바탕으로 최적의 조업 및 설계 조건을 구할 수 있다.

2절에서 언급된 원료 SF₆가스 처리 공정에 대한 최적화 문제는 다음과 같이 구성하였다. 목적 함수로서 공정 모델의 에너지 소모량(reboiler duty, Q)을 사용하였다. 증류 공정의 경우 최적화 변수로 환류비와 탑상 유속을 고려하였으며 액화 공정, 결정화 공정의 경우 최적화 변수로 온도(temperature), 압력(pressure)을 고려하였다. 모든 공정의 경우 제한변수인 SF₆가스의 순도를 99%, 회수율 80% 이상을 만족하도록 하였다. 각 공정에 따라 제한 변수가 다르기 때문에 최적화 문제를 2가지 경우로 나누어 구성하였다. 우선 액화 공정, 결정화 공정의 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\text{Minimize } (Q) = f(\text{pressure, temperature})$$

$$\text{Subject to Purities } (XD) = 99\%$$

$$\text{Recoveries } (R) = 80\%$$

그러나 증류 공정의 최적화는 다른 공정들과 최적화 변수가 다르기 때문에 다음과 같이 구성하였다.

$$\text{Minimize } (Q) = f(\text{distillate rate, reflux ratio})$$

$$\text{Subject to Purities } (XD) = 99\%$$

$$\text{Recoveries } (R) = 80\%$$

5. 최적화 결과 및 검토

각 공정에 대하여 3절에서 언급한 최적화(optimization) 문제를 구성하였으며, 2절의 변수의 영향을 검토하여 최적화 변수들의 범위를 정해주었다. 제한 변수로서 순도 99%, 회수율 80%를 만족하고, 목적 함수인 에너지 소모량(Q)을 최소로 하는 최적화 변수들의 값을 얻었다.

액화 공정의 경우 최적화 변수로 온도와 압력을 정해주었다. 온도는 140~280 K, 압력은 4~9 bar의 범위로 하였다. 결정화 공정의 최적화 변수로 온도와 압력에 대하여 온도는 140~260 K, 압력은 4~9 bar의 범위를 정하였다. 증류 공정의 최적화 변수로 액화 공정과 결정화 공정과 달리 탑상 유속과 환류비를 정해주었다. 탑상 유속의 범위는 0.25~0.50 kmol/s이며, 환류비의 범위는 3.5~6.0이다.

Table 4는 세 가지 공정의 최적화 결과이다. 각 공정의 최적의 에너지 소모량 및 최적화 변수들의 값을 구하였다. 액화 공정은 압력 5.927 bar, 온도 235.475 K에서 에너지 소모량 1531.111 kW를 보였다. 결정화 공정은 압력 4 bar, 온도 224.491 K에서 에너지 소모량 880556.064 kW를 보였다. 증류 공정은 환류비 0.031, 탑상 유속 0.273 kmol/s에서 에너지 소모량 817.072 kW를 보였다.

Table 4. Results of optimization for three processes

	Pressure (bar)	Temperature (K)	Energy consumption (kW)
Liquefaction process	5.927	235.475	1531.111
Crystallization process	4	224.491	880556.064
	Reflux ratio	Distillate rate (kmol/s)	
Distillation process	0.031	0.273	817.072

최적의 공정으로 가장 적은 에너지 소모량을 나타낸 공정은 증류 공정이다. SF₆가스를 현장에서 바로 재충전하여 사용할 수 없는 경우는 제조 공정으로 옮겨져 불순물을 제거하여 이용이 가능하다. 그러나 이번 연구의 목적은 SF₆가스를 회수하는데 있어 현장에서 바로 재충전하여 사용이 가능한 경우의 최적의 공정을 찾아내는 것이므로 가장 중요한 점은 에너지 소모량이 적을 뿐 아니라 이동성이 가장 좋은 공정을 찾아내는 것이다.

결정화 공정의 경우 다른 공정보다 순도 및 회수율에 대하여 높은 성능을 보이지만, 가장 에너지 소모량이 많이 드는 공정이며, 현실적인 공정의 경우 급속하게 SF₆가스를 냉각시키는 과정에서 기포가 빠지지 못하게 되는 문제점이 발생할 수도 있다. 증류 공정은 에너지 소모량 면에서 매우 뛰어나지만, 현실적으로 이동성이 낮기 때문에 적절하지 않다. 또한 장치비 및 운영비가 많이 드는 단점을 가지고 있다. 액화 공정의 경우 에너지 소모량 면에서도 적절하며, 세 공정 중에서 장치가 간단하고 운영비도 적게 든다. 또한 이동성이 뛰어나 SF₆가스를 회수하는데 있어 가장 적절한 공정이라고 판단할 수 있다.

추가적으로 액화 공정에 대하여 회수율과 순도 변화에 따른 온도, 압력의 최적점 변화를 알아보았다. Figure 9는 순도 99%에 대하여 회수율을 55~95% 변화를 주어, 온도와 압력의 최적점 변화를 나타내었다. 같은 순도에서 회수율을 높이기

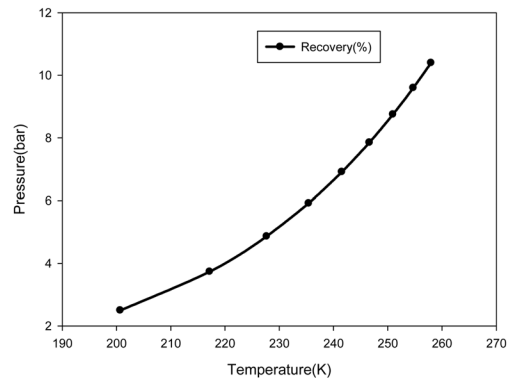


Figure 9. Liquefaction process: variation of optimization point with change of recovery (purity 99%).

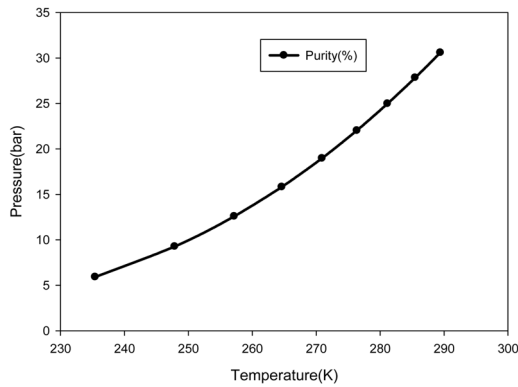


Figure 10. Liquefaction process: variation of optimization point with change of product purity (Recovery 80%).

위해서 온도와 압력을 같이 낮추는 것이 최적이며 회수율에 따라 에너지 소모량은 증가하였다. 이는 액화를 통해 회수되어야 하는 SF₆ 가스의 양이 늘어나므로 에너지 소모량이 증가하게 된다. Figure 10은 회수율 80%에 대하여 순도를 95~99% 변화를 주어, 이 때의 온도와 압력의 최적점 변화를 나타내었다. 같은 회수율에서 순도를 높이기 위해서 온도와 압력을 같이 낮추는 것이 최적이며, 순도가 높아질수록 에너지 소모량은 증가하였다. 일반적으로 회수율을 높이기 위해서는 온도를 낮추거나 압력을 높여야 한다. 이러한 경우 순도가 떨어지는 경향을 보인다. 또한 순도를 높이기 위해서는 온도를 높이거나 압력을 낮추어야 한다. 이러한 경우 회수율이 낮아지는 단점이 있다. 즉 순도와 회수율은 상반되는 경향을 보인다. 그러나 Figure 9, 10의 결과를 통하여 순도를 유지하면서 회수율을 높이거나, 회수율을 유지하면서 순도를 증가시키는 것이 가능함을 알 수 있다.

6. 결론

SF₆가스는 지구온난화 지수(Global Warming Potential, GWP)이 CO₂의 약 22,000배로 극히 높고 불활성 가스이면서 높은 절연성과 열적 안정성이 높은 물질이다. 최근 지구환경보호에 대한 의식이 높아지면서 이 가스가 온실 효과가 높은 물질임이 알려져 그 사용에 대해 전 세계적으로 규제되는 경향을 보이고 있다.

본 연구에서는 SF₆가스를 회수하는 액화 공정, 결정화 공정, 증류 공정에 대하여 모사를 행하였고, 각 공정 변수들의 영향을 살펴보았다. 또한, Aspen plus의 최적화 기능을 이용하여 각 공정들을 최적화하였으며 이를 바탕으로 각 공정을 비교하였다. 이상의 연구로부터 다음의 결론을 도출하였다. 액화 공정에서 공정 변수인 온도와 압력의 변화에 따라 에너지 소모량,

회수율, 순도는 변화를 나타내었다. 에너지 소모량은 온도가 낮을수록 증가하였다. 회수율은 온도가 낮을수록 압력이 높을수록 증가하였다. 순도는 온도가 높을수록 그리고 압력이 낮을수록 증가하였다. 에너지 소모량, 회수율, 순도에 대하여 알아본 결과 압력보다는 온도에 더 민감한 것으로 나타났다. 결정화 공정은 다른 공정에 비하여 매우 높은 순도를 나타내었으며 압력을 높게, 온도를 낮게 할수록 회수율을 높일 수 있었다. 증류 공정의 경우 환류비가 증가할수록 순도와 회수율이 증가하였다.

세 공정들에 대하여 최적화를 수행하였으며 제한 변수인 순도 99%, 회수율 80%의 조건하에서 최소의 에너지 소모를 나타내는 공정은 증류 공정이었다. 증류 공정은 에너지 소모량 면에서 가장 효율적인 공정이지만 SF₆가스를 회수하기 위해 가장 중요한 이동성에 많은 어려움을 가지고 있다. 또한, 장치비 및 운영비가 많이 든다는 단점을 가지고 있다. 장치비 및 이동성 등을 감안하였을 때는 액화 공정이 현실적으로 가장 적절한 공정이다.

액화 공정에 대하여 회수율과 순도 변화에 따른 온도, 압력의 최적점의 변화를 알아보았다. 순도 99%에 회수율이 높아질수록 온도와 압력을 동시에 낮게 유지하는 것이 최적이다. 마찬가지로 회수율 80%에 대하여 순도가 높아질수록 최적 운전은 온도와 압력을 낮추는 것이다. 일반적으로 순도와 회수율은 상반되는 경향을 보인다. 그러나 이상의 결과에서 순도를 유지하면서 회수율을 높이거나, 회수율을 유지하면서 순도를 증가시키는 것이 가능하였다.

참고문헌

1. V. V. Timofeev, B. S. Lunin, N. Y. Mordkovich, and Y. N. Zhitnev, "Dynamics of Vibrational Relaxation of Multiphoton Excited SF₆ Molecules in Gaseous Mixtures Containing Ozone and Inert Gases (He, Ar, Kr)," *Laser Chem.*, **10**, 159-167 (1989).
2. P. Jannick, "A Novel Purification Process for Used SF₆ from Electrical Installations," International Conference on SF₆ and the Environment, December 1-3 (2004).
3. S.-H. Lee, N.-K. Park, S.-H. Yoon, W.-C. Chang, and T.-J. Lee, "Catalytic Decomposition of SF₆ by Hydrolysis and Oxidation over γ -Al₂O₃," *Clean Technol.*, **15**(4), 273-279 (2009).
4. S. Bartos, J. Marks, R. Kantamaneni, and C. Laush, "Measured SF₆ Emissions from Magnesium Die Casting Operations," Presented at the 132ND TMS Annual Meeting, March 2-6 (2003).
5. J.-H. Lee, Y.-K. Yeo, H.-M. Moon, and D.-S. Park, "Modeling and Simulation of Sulfur Hexafluoride (SF₆) Purification Process," *Korean J. Chem. Eng.*, **17**(2), 252-256 (2000).