

아스펜 플러스를 이용한 폭발성 가스 건식 연소 처리공정의 열회수 모델링 및 엑서지 분석

Heat Recovery Modeling and Exergy Analysis of Dry Combustion Process for Explosive Gas Treatment Using Aspen Plus

최용만 · 최창식^{1)*} · 홍범의¹⁾ · 조성수¹⁾ · 김용진²⁾ · 김학준²⁾

사빅 기술연구소, ¹⁾고등기술연구원, ²⁾한국기계연구원

(2017년 8월 14일 접수, 2017년 9월 10일 수정, 2017년 10월 10일 채택)

YongMan Choi, Changsik Choi^{1)*}, Bumeui Hong¹⁾, Sung Su Cho¹⁾,
Yong Jin Kim²⁾ and Hak Joon Kim²⁾

SABIC Technology Center, Saudi Arabia

¹⁾Institute for Advanced Engineering, Korea

²⁾Korea Institute of Machinery & Materials, Korea

(Received 14 August 2017, revised 10 September 2017, accepted 10 October 2017)

Abstract

In the combustion treatment of explosive gases with a high heating value such as H₂ and NH₃ used in semiconductor and chemical processes, the heat recovery modeling and exergy analysis of the process using the Aspen Plus simulator and its thermodynamic data were performed to examine the recovery of high temperature thermal energy. The heat recovery process was analyzed through this process modeling while the exergy results clearly confirmed that the rigorous reaction mainly occurs in the condenser and the chamber. In addition, the process modeling demonstrated that approximately 95% of the exergy is destructed on the basis of the exergies injected and the exergy being exhausted. Using the exergy technique, which can quantitatively analyze the energy, we could understand the energy flow in the process and confirm that our heat recovery process was efficiently designed.

Key words : Heat recovery modeling, Exergy analysis, Dry combustion process, Aspen Plus, Explosive gas treatment, Process modeling

1. 서 론

반도체 및 화학공정에서는 다량의 폭발성 유해가스가 사용되어지며(Kim and Lee, 2013; Yoo, 2007) 따라

서 이의 연소 처리 과정에서 발생하는 열에너지의 재사용 기술을 접목한 에너지 회수형 건식 연소 처리 장치가 개발되어지고 있다(Park *et al.*, 2009; Fujisawa *et al.*, 2002).

현장에서 사용되는 주요 폭발성 가스로는 H₂, NH₃, SiH₄, GeH₄ 및 DCS (Dichloro silane) 등이 있는데

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-330-7205, E-mail : cschoi@iae.re.kr

Table 1. Nomenclature of abbreviations and symbols.

Exergy	Maximum useful work available in thermodynamics	S002	Explosive gas after heat exchanger
HXGAS	Heat exchanger for explosive gas inlet	S003	Air after heat exchanger
HXAIR	Heat exchanger for air inlet	S004	Gas mixture injected into the reactor after the heat exchanger
PCW	Condenser for process cooling water	H	Enthalpy
Rstoic	Stoichiometric reactor	S	Entropy
Ex_phys	Physical exergy	H ₀	Standard state enthalpy
Ex_chem	Chemical exergy	S ₀	Standard state entropy

(Song and Kim, 2002; Kim and Hwang, 2001) 발열량이 높은 가스들로서 이들의 분해 및 연소과정에서 발생하는 고온의 열에너지는 그 이용가치가 충분함에도 불구하고 운영 및 제어의 어려움 등을 이유로 대부분 폐기되는 실정이며, 최근 안정적인 연소 처리를 통해 버려지는 열에너지를 회수하고자 하는 시도가 이루어지고 있다(Choi *et al.*, 2016; Lombardi *et al.*, 2011, Song *et al.*, 2009).

아스펜 플러스(Aspen Plus, AspenTech)는 물질 및 열 수지(mass and energy balance)와 화학적 평형, 열역학 데이터를 근거로 공정 모사를 할 수 있는 프로그램으로 검증되어 사용하려는 시도가 국내에서 이루어지고 있고(Lee *et al.*, 2009), 냉각기의 열회수 단계 또는 석탄 화력 발전소에서 배가스로부터 폐열을 회수하는 단계에서 에너지 효율을 높이기 위한 해결 방법으로 엑서지 분석을 통한 다양한 제안이 이루어지고 있다(Noroozian *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2012).

본 연구에서는 아스펜 플러스를 사용해서 가스 유량 600 L/min급 연소 공정의 열회수 공정에 대한 고찰을 위해서 공정 모사를 수행하였으며, 본 공정 모사를 통해서 실험 장치 및 공정 구성에 사용될 수 있는 열회수 공정의 주요 인자를 도출하고자 하였다. 또한 정량적인 에너지 분석이 가능한 엑서지 기법을 활용해서 공정 내 에너지의 흐름을 파악해 보고자 하였다. 표 1에는 공정모사의 구성을 위해 사용된 약어와 기호들의 명칭을 정리하였다.

일반적으로 공정의 설계 및 운영상의 최적화를 위해 엑서지 분석의 적용이 이루어지고 있는 바, 본 연구에서는 열회수 부분이 어느 단계에서 비가역적 반응으로 인해 열회수가 잘 되지 않고 버려지는지를 엑서지 기법(exergy analysis)을 사용해서 분석해보고자 하였으며, 엑서지는 공정 중에 저장되지 않으며 손실되는 특성이 있으므로 주어진 공정에서 회수 가능한 에너지

회수율을 계산해보고자 하였다. 잘 알려진 것과 같이 열역학 제1법칙을 기반으로 하는 에너지 분석은 오직 에너지보존에 대해서만 분석이 가능하고, 공정 내에서 손실이 일어나는 위치 그리고 양을 파악할 수가 없으므로 에너지의 질을 정량화할 수가 없다고 볼 수 있다. 이에 반하여 열역학 제1법칙과 제2법칙을 기반으로 하는 엑서지 기법은 에너지원들에 대한 정량적인 분석이 가능하므로 공정에서 일어나는 에너지 분석을 보다 원활하게 수행할 수가 있다. 즉, 대상 시스템 혹은 단위공정의 투입 값과 배출 값을 비교함으로써 손실이 일어나는 원인과 위치를 파악이 가능하므로 냉각 장치 및 화학공정 등의 에너지 분석에 널리 사용이 가능하다(Hongbo *et al.*, 2017).

2. 연구 및 방법

2.1 폭발성 가스 연소 및 열회수 공정의 구성

600 L/min급 폭발성 가스 연소반응의 공정을 통해 아스펜 플러스를 사용해서 버려지는 폐열의 회수 가능한 효율을 확인하고자 엑서지 분석을 수행하였으며, 이를 위해 그림 1과 같은 폭발성 가스 연소 및 열회수 공정도를 구성하였다. 공정 구성을 설명하면 건식 방식의 연소 열원을 발생하는 플라즈마 토치(Plasma torch), 폭발성 가스의 연소반응이 이루어지는 플라즈마 연소 챔버(Plasma Combustion)와 폐열을 회수하는 연소 배가스의 열교환기(Heat Exchanger)로 이루어져 있다.

폭발성 가스의 건식 연소시에 배출되는 연소 온도는 600°C 정도의 고온으로서, 이는 공정 후단에 구성된 열교환기를 통해 유입되는 폭발성 가스 및 연소 공기에 회수됨으로써, 폭발성 가스의 연소시에 폭발의 위험으로부터 안정적인 연소를 위한 분위기 온도 조건을

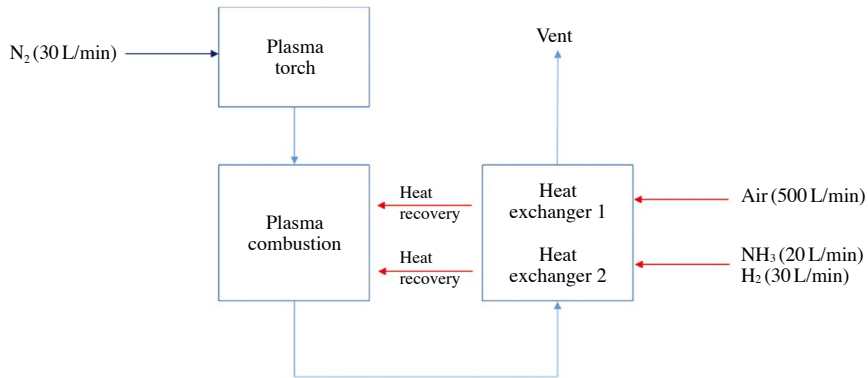


Fig. 1. Schematic diagram of explosive gas dry combustion process.

형성하게 되고 또한 건식 연소장치에서 열원을 공급하는 플라즈마토치의 에너지 소비를 최소화할 수 있는 장점을 활용하고자 하였다.

본 아스펜 플러스를 사용한 건식 연소 처리공정의 모델링을 위한 처리 대상 가스는 N₂ (30 L/min), Air (500 L/min)를 기준으로 유량을 고정하였고, 처리 대상 폭발성 가스로는 NH₃ (20 L/min), H₂ (30 L/min)를 기준으로 유량 조건을 조절하였으며, 본 연구에 사용된 열교환기 모델은 생성가스의 온도를 기준으로 공정 모사를 수행하였다.

2.2 아스펜 플러스를 사용한 열회수 공정 모델링

본 연구에 진행된 열회수에 대한 기초 공정 모사를 위하여 아스펜 플러스(Aspen Plus, AspenTech)를 사용하여 모사하였고 공정 모델을 위해 Peng-Robinson 물성식이 사용되었다.

본 연구를 위해서 실험에서 실제 사용된 가스 중에서 아스펜 플러스에서 물성치를 제공하는 H₂와 NH₃를 대상으로 하였고, H₂ 단일 가스의 경우와 H₂와 NH₃ 혼합 가스의 경우로 구분하여 공정 모사를 수행하였다. 이를 위해 엑서지 기법(exergy analysis)을 이용한 에너지 회수에 대한 모사를 수행하기 위해 필요한 물성치로서 온도, 압력, 엔트로피, 엔탈피, 그리고 엑서지 정보를 확인하였다.

다음 단계로서 그림 2와 같은 에너지 회수 공정도를 구현하였으며, 실제 실험 공정을 모사하기 위하여 두

개의 열교환기 모델과 응축기(PCW) 모델을 사용하였다. HXGAS (Heat exchanger for explosive gas inlet)는 수소와 암모니아 가스, 그리고 비활성 가스인 질소를 혼합한 후에 반응 챔버에서 생성되어 나오는 반응열을 회수하여 반응 챔버로 투입되는 가스를 가온하기 위해서 사용되었다. 이 경우 질소를 반응 가스와 혼합한 이유는 공정 모델링 시에 발생할 수 있는 비이상적인 열교환기 온도의 크로싱(crossing)을 제어하기 위함이고, 비활성 가스이기에 실제 화학반응에는 관여하지 않기에 사용되었다.

HXGAS에 입력되는 챔버로부터 나오는 반응 물질의 온도는 600°C로 고정하였고, 열교환 후에 출력되는 온도는 535°C로 고정하였다. 그리고 HXAIR (Heat exchanger for air inlet)는 챔버에서 일어나는 산화반응에 사용될 공기를 가온하기 위한 열교환기를 모사하였다. 입력 온도는 HXGAS의 반응 생성 가스의 출력 온도인 535°C가 사용되었고, 열교환 후에 출력 온도는 200°C로 고정하였다. 열교환기를 통과한 반응 생성물 중에 액체인 물을 분리하기 위해서 flash 모델을 사용해서 물과 가스를 100% 분리하였고, 이때 최종 온도는 60°C로 고정하였으며 H₂O와 GAS로 각각 공정도에 표시되어 있다. 특히 수소와 암모니아의 산화반응을 모사하기 위해서 Rstoic (stoichiometric reactor) 방식의 화학량론적 반응기 모델을 사용하였고, 그 화학식은 다음과 같다. 두 반응 모두 정상상태(steady-state)라 가정하였고, 챔버의 온도는 실험 결과에서 사용된 열교환기 전단에서 측정된 600°C를 사용하였으며, 압력은

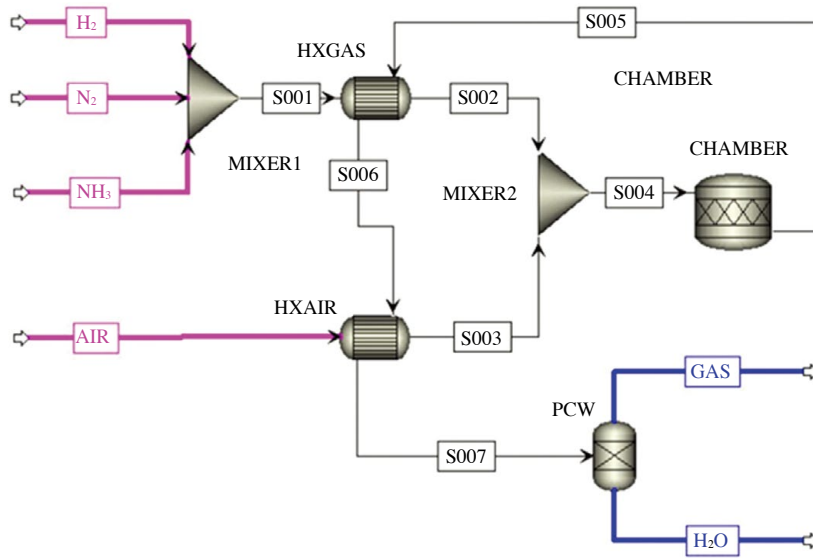


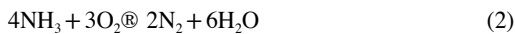
Fig. 2. Flow chart used for process simulation using Aspen Plus (HXGAS: Heat exchanger for explosive gas inlet, HXAIR: Heat exchanger for air inlet, PCW: Condenser for process cooling water).

Table 2. Stream temperatures and reaction heat depending on gas flow condition of the heat recovery process.

No	Gas		Stream			Reaction heat	
	H ₂ (L/min)	NH ₃ (L/min)	S002 (°C) ^{a)}	S003 (°C) ^{b)}	S004 (°C) ^{c)}	kW	× 10 ³ kW/(L/min)
1	20	0	587.1	412.7	433.9	-3.50	-6.7
2	30	0	526.3	417.2	431.9	-5.45	-10.3
3	20	10	505.3	422.8	434.7	-6.13	-11.6
4	20	20	448.8	432.8	435.4	-8.75	-16.2
5	30	10	462.5	427.2	432.7	-8.07	-14.9
6	30	20	416.6	437.2	433.5	-10.69	-19.4

^{a)}S002: Explosive gas after heat exchanger. ^{b)}S003: Air after heat exchanger. ^{c)}S004: Gas mixture injected into the reactor after the heat exchanger.

대기압으로 가정하였다. 이는 본 공정 모사에서 사용된 열교환기의 전단과 후단의 차이가 없다고 가정된 것과 유사하다고 볼 수 있다.



실험에서 사용된 실제 공기의 양이 본 아스펜 플러스 공정 모델링에 적용되었기에, 수소와 암모니아 가스는 100% 반응을 하여 열을 발생하고, 공통적으로 액상인 물이 생성된다. 생성된 물을 분리하기 위해서 앞 에 언급한 것처럼 플래시 (flash) 모델을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 아스펜 플러스를 사용한 열회수 공정 모델링 결과 비교

600 L/min급 공정에 열회수 공정에 대한 고찰을 하기 위해서 공정 모사를 수행하였는데, 단일가스인 수소 20 L/min 및 30 L/min의 각각의 조건과 암모니아와 수소 혼합가스 조건의 반응열을 계산하기 위하여 6가지의 반응조건으로 표 2와 같이 구분하여 수행하였다. 본 연구에 사용된 열교환기 모델은 생성가스의 온도를 기준으로 구성하였기 때문에 위의 언급된 것처럼 가스 챔버와 공기 챔버의 온도를 각각 535°C와 200°C로 일

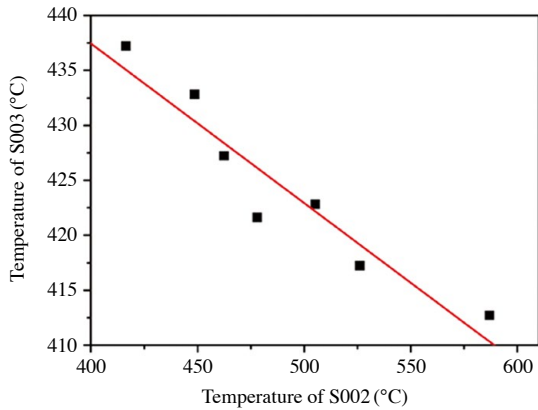


Fig. 3. Correlation between temperature of S002 and temperature of S003.

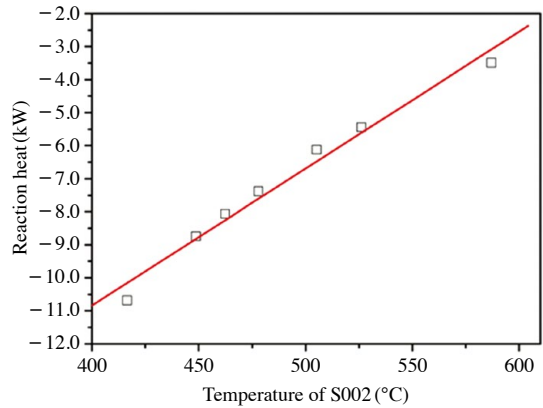


Fig. 5. Correlation between S002 of temperature and reaction heat (kW).

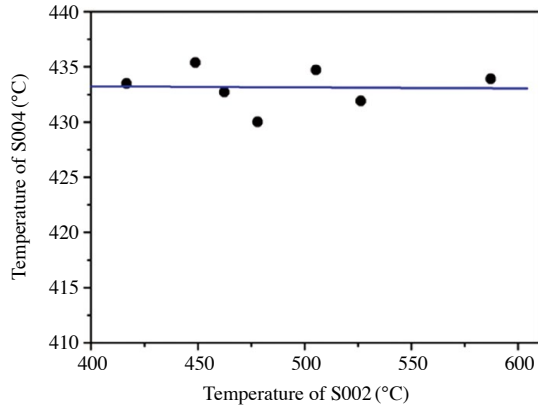


Fig. 4. Correlation between temperature of S002 and temperature of S004.

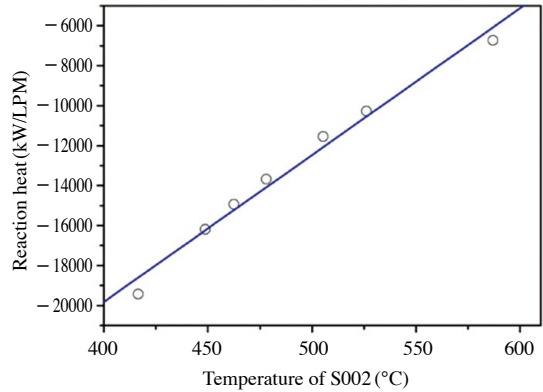


Fig. 6. Correlation between of S002 temperature and reaction heat (kW/(L/min)).

정하게 유지하면서 공정 모사를 하였다.

표 2에서 보여주는 것처럼 순수한 수소의 경우보다는 암모니아를 혼합해서 사용하는 경우가 생성되는 반응열이 점차적으로 증가함을 보였다. 즉, No. 1 vs. No. 3 vs. No. 4 : -3.50 kW vs. -6.13 kW vs. -8.75 kW 로 증가함을 알 수 있다. 사용되는 가스들의 부피가 영향을 줄 수도 있음을 검증하기 위해서, 공정 모사에 사용된 가스의 부피 유량을 기준으로 표준화한 경우에도 동일한 경향이 나타남을 표 2를 통해 확인할 수 있다. 즉, No. 1 vs. No. 3 vs. No. 4 : $-6.7 \times 10^3 \text{ kW}/(\text{L}/\text{min})$ vs. $-11.6 \times 10^3 \text{ kW}/(\text{L}/\text{min})$ vs. $-16.2 \times 10^3 \text{ kW}/(\text{L}/\text{min})$ 으로 증가함을 알 수 있다. 암모니아가스를 혼합

하는 경우에 생성열이 증가하는 이유는 식 1과 식 2에서 표준반응열이 $-316.9 \text{ kJ}/\text{mol}$ 과 $-241.9 \text{ kJ}/\text{mol}$ 의 차이가 나기 때문이다.

언급된 내용을 조금 더 상세하게 분석하기 위해서 다음과 같이 여러 상관 관계를 비교해 보았다. 그림 3은 1차 열교환기를 거친 후 공정에 사용될 반응가스(S002)와 공기(S003)와의 상관관계를 보여주고 있는데, 두 스트림의 온도가 역비례함을 보여주고 있다. 그림 4의 경우에는 열교환기를 거쳐 반응 챔버에 주입되는 혼합가스(S004)의 온도는 평균 433°C 로 일정하게 주입됨을 보여주고 있다. 특히 반응열과 온도에 대한 상관관계를 비교한 결과, 그림 5와 같이 부피 유량

에 대한 표준화를 하지 않은 경우의 $R^2=0.98$ 과 그림 6과 같이 부피 유량으로 표준화를 한 경우 $R^2=0.99$ 로서 근소하지만 부피 유량으로 표준화를 한 경우가 조금 더 일정한 상관관계가 나타남을 관찰하였다.

3.2 엑서지 분석(Exergy analysis)

엑서지 분석을 위해서는 1차적으로 physical exergy (Ex_{phys})와 chemical exergy (Ex_{chem})를 계산해야만 하는데, $Ex_{phys} = (H - H_0) - T_0(S - S_0)$ 를 사용하여 아스펜 플러스를 통해서 계산이 가능하다. H 와 S는 필요 온도와 압력에 의존하는 엔탈피(enthalpy)와 엔트로피(entropy)를 나타내며, H_0 와 S_0 는 25°C, 1 atm에서 계산된 표준 엔탈피(standard state enthalpy)와 표준 엔트로피(standard state entropy) 값이다. Total exergy는 다음과 같이 계산된다.

$$\text{Total exergy} = Ex_{phys} + Ex_{chem} \quad (3)$$

본 엑서지 비교를 위해서 수소 단일가스인 H_2-40 ($H_2 = 40 \text{ L/min}$ 의 조건) 그리고 혼합가스인 H_2-20/NH_3-20 ($H_2 = 20 \text{ L/min} + NH_3 = 20 \text{ L/min}$ 의 조건)인 조건을 기준으로 계산을 수행하였다.

표 3은 그림 2의 공정 흐름도를 기초로 해서 수소 단일가스 조건인 H_2-40 와 혼합가스 조건인 H_2-20/NH_3-20 에 대해 계산된 각 스트림(steam)에 대한 엑서지 값들을 정리한 결과이다. 이를 기반으로 해서 엑서지 투입량과 배출량을 계산하여 표 4에 정리하였다.

이때 가장 유용한 정보는 어느 단위공정(unit operation)에서 엑서지가 사용되어지고, 어느 공정에서 잘 사용되어지지 않는지를 확인할 수 있다는 것이다. 표 4와 같이 1차적으로 사용되는 가스의 성분이 가진 엑서지와 반응챔버에서 사용되는 열(heat)이 주요 엑서지로 주입이 됨을 나타내고 있다. 그리고 배출되는 엑서

Table 3. Calculated total energy in kW.

Stream	H_2-40	H_2-20/NH_3-20
	Exergy (kW)	Exergy (kW)
AIR	0.467	0.467
GAS	0.458	0.449
H_2	6.430	3.215
H_2O	0.029	0.036
N_2	0.025	0.025
NH_3	0.000	4.643
S001	6.455	7.883
S002	6.779	8.207
S003	1.954	2.022
S004	8.731	10.229
S005	3.579	3.685
S006	3.048	3.139
S007	0.920	0.948

Table 4. Exergy inputs and emissions.

Exergy In	H_2-40		H_2-20/NH_3-20	
	(kW)	(%)	(kW)	(%)
H_2	6.43	66.1	3.22	27.9
NH_3	0.00	0.0	4.64	40.4
Air	0.47	4.8	0.47	4.1
heat	2.82	29.0	3.18	27.6
	9.72		11.51	
Exergy Out	(kW)	(%)	(kW)	(%)
Gas	0.46	4.7	0.45	3.9
H_2O	0.03	0.3	0.04	0.3
	0.49	5.0	0.48	4.2
Destructed exergy	9.23	95.0	11.02	95.8

Table 5. Exergy input and emissions related to unit operation.

H_2-40	Exergy in (kW)	Exergy out (kW)	Destructed exergy (kW)	Exergy efficiency (%)	Improvement (kW)
HXGAS	10.03	9.83	0.21	97.9	0.00
HXAIR	3.52	2.87	0.64	81.8	0.12
PCW	0.92	0.49	3.26	52.9	1.54
CHAMBER	8.73	3.58	5.15	41.0	3.04
Sum			9.23		4.70 (50.9%)
H_2-20/NH_3-20	Exergy in (kW)	Exergy out (kW)	Destructed exergy (kW)	Exergy efficiency (%)	Improvement (kW)
HXGAS	11.57	11.35	0.22	98.1	0.00
HXAIR	3.61	2.97	0.64	82.4	0.11
PCW	0.95	0.50	3.63	53.0	1.70
CHAMBER	10.23	3.69	6.54	36.0	4.19
Sum			11.02		6.01 (54.6%)

지는 스트림 조건별로 각각 0.49 kW와 0.48 kW로 거의 유사하다. 이때 중요한 점은 열회수 공정 없을 경우에 버려지는 엑서지 (destructured exergy)인데 스트림 조건별로 각각 9.23 kW와 11.02 kW로서 대략 95%의 엑서지가 사용되지 않고 버려지는 것으로 계산된다.

표 5에 정리된 것처럼 버려지는 엑서지 (destructured exergy)는 대부분 응축기(PCW)와 반응챔버(CHAMBER)에서 발생됨을 나타내고 있다. 따라서 응축기와 반응챔버에 사용되는 엑서지를 유용한 엑서지로 전환할 수 있는 정도를 제안하기 위해서 Improvement = (1 - Exergy Efficiency) × Destructed Exergy를 계산하여 표 5에 정리하였다. H₂-40의 조건보다는 H₂-20/NH₃-20의 조건이 약간 더 높은 열회수 효율(improvement %)이 나타났는데, 이는 순수한 수소를 사용하는 조건보다는 반응열을 더 내는 혼합가스를 사용하는 조건의 경우가 엑서지 출력량이 더 높으며 아울러 유용한 엑서지로 전환될 수 있는 정도가 조금 더 높은 것을 감안하였을 때, 본 공정에서 사용되는 반응가스는 열 회수 측면에서 혼합가스의 조건이 더 유용함을 나타내주고 있다.

4. 결 론

폭발성 유해가스가 발생하는 공정에 대하여 아스펜 플러스 모델링을 실시하여 열회수 과정을 분석하였고, 엑서지 기법을 활용해서 비가역 반응이 주로 일어나는 단위공정으로 응축기와 챔버임이 밝혀졌다. 열교환기의 폐열 회수는 매우 이상적인 공정임을 보여주었는데, 단일가스인 H₂-40의 조건에서는 50.9%의 열회수 효율(improvement %)이 확인되었고 혼합가스인 H₂-20/NH₃-20의 조건에서는 약간 더 높은 54.6%의 열회수 효율이 확인되었다. 이를 토대로 실제로 실험에 사용되는 단위공정과 반응기에 대한 연구에 있어서 본 기법을 활용한다면 시간과 비용을 절약할 수 있을 것이다. 향후 반도체 공정에서 사용되는 다양한 가스성분들은 추가로 포함하여 아스펜 플러스 공정 모델링을 보완한다면 좀 더 정확한 결과가 도출될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 환경산업선진화사업의 지원으로 수행되었으며(Eco-Innovation Project 2014000110021) 이에 감사드립니다.

References

- Choi H.-Y., B.U. Hong, C.J. Jeong, and C.S. Choi (2016) Improvement of Plasma Torch Shape for Upgrading Efficiency of Explosion Gases Elimination in Semiconductor Process, Journal of Thermal & Environmental Engineering, 13(1), 1-7. (in Korean with English Abstract)
- Fujisawa, S., M. Moriya, K. Yosa, S. Nishiwaki, H. Yamamoto, T. Katsuki, Y. Nabeshima, and H. Oda (2002) Removal of gaseous chemical contaminants as well as heat recovery by air washer (Part 2), Proceeding of the 20th Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control, 162-165.
- Kim, J.-H. and J.J. Lee (2013) Management Changes of Hazardous Air Pollutants Sources and Its Proposed Improvement in Korea, J. of Korean Society for Atmospheric Environment, 29(5), 536-544. (in Korean with English Abstract)
- Kim, Y.J. and J.H. Hwang (2001) Flue gas treatment technology in semiconductor manufacturing process, Air Cleaning Technology, 14(3), 15-22.
- Lee, J.-H., M.-H. Jung, Y.-H. Kwon, G.-W. Lee, and B.-H. Shon (2009) Simulation of the flue gas treatment processes of an industrial-waste incinerator using Aspen plus, Journal of Academia-industrial Technology, 10(11), 3246-3252. (in Korean with English Abstract)
- Lombardi, L., E. Carnevale, and A. Corti (2011) Analysis of energy recovery potential using innovative technologies of waste gasification, Waste Management, 32(4), 640-652.
- Noroozian, A., A. Mohammadi, M. Bidi, and M.H. Ahmadi (2017) Energy, exergy and economic analyses of a novel system to recover waste heat and water in steam power plants, Energy Conversion and Management, 144, 351-360.
- Park, C.-W., K.-S. Kwon, W.-B. Kim, B.-K. Min, S.-J. Park,

- I.-H. Sung, Y.-S. Yoon, K.-S. Lee, J.-H. Lee, and J.-W. Seok (2009) Energy Consumption Reduction Technology in Manufacturing-A Selective Review of Policies, Standards, and Research, *International journal of precision engineering and manufacturing*, 10(5), 151-173. (in Korean with English Abstract)
- Song, G.-S., K.-H. Yoo, S.-Y. Kang, and S.-W. Son (2009) An Experimental Study on Energy Reduction of an Exhaust Air Heat Recovery Type Outdoor Air Conditioning System for Semiconductor Manufacturing Clean Rooms, *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering*, 21(5), 273-281. (in Korean with English Abstract)
- Song, Y.H. and Y.J. Kim (2002) Atmospheric Pressure Plasma Applications to Treat Off-Gases from Semiconductor Manufacturing, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 19(8), 34-37.
- Tan, H., H. Fu, and J. Yu (2017) Evaluating optimal cooling temperature of a single-stage thermoelectric cooler using thermodynamic second law, *Applied Thermal Engineering*, 123, 845-851.
- Wang, D., A. Bao, W. Kunc, and W. Liss (2012) Coal power plant flue gas waste heat and water recovery, *Applied Energy*, 91, 341-348.
- Yoo, K.-H. (2007) Reduction of air conditioning energy in semiconductor/display manufacturing clean rooms, *Air Cleaning Technology*, 20(4), 1-18.