

압력순환흡착법과 다공성 매체 연소법을 이용한 전자산업 불화가스 저감 스크러버 개발

정종국^{1,*}, 이기용¹, 이상곤¹, 이은미¹, 모선희¹, 이대근¹, 김승곤²

¹글로벌스탠다드테크놀로지
경기 화성시 동탄면 동탄산단 6길 15-13
²한국에너지기술연구원
대전광역시 유성구 가정로 152

(2016년 11월 3일 접수; 2016년 11월 22일 수정본 접수; 2016년 11월 24일 채택)

The Development of Scrubber for F-gas Reduction from Electronic Industry Using Pressure Swing Adsorption Method and Porous Media Combustion Method

Jong Kook Chung^{1,*}, Ki Yong Lee¹, Sang Gon Lee¹, Eun Mi Lee¹,
Sun Hee Mo¹, Dae Keun Lee², and Seung Gon Kim²

¹Global Standard Technology
15-13, Dongtansandan 6-gil, Dongtan-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea
²Korea Institute of Energy Research
152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

(Received for review November 3, 2016; Revision received November 22, 2016; Accepted November 24, 2016)

요 약

반도체 및 디스플레이 산업에서 배출되는 과불화합물은 연소, 열, 플라즈마, 촉매 등의 다양한 방법이 적용된 스크러버에 의해 분해 과정을 거친 후 배출되나, 운영 스크러버의 대부분이 과도한 에너지의 사용, 낮은 저감 효율을 보임으로써 이러한 단점의 극복이 요구된다. 압력순환흡착법과 다공성 매체 연소법의 두 가지 기술이 연계된 새로운 형태의 과불화합물 저감 스크러버를 개발하고 특성을 알아보았다. 분해 대상인 CF₄의 흡착비와 손실계수는 흡착 컬럼의 입구와 출구에서 농도 측정을 통해 계산하였으며, 연소기의 입구와 출구의 유량과 농도 측정을 통해 처리 효율을 계산하였다. 기존 스크러버와의 에너지 사용량 및 처리효율 비교를 위하여 다양한 유량에 대한 성능 평가가 진행되었다. 1412 ppm, 204 LPM의 CF₄가 유입된 흡착 컬럼에서의 흡착비는 1.65였으며, 유입되는 CF₄의 손실 계수는 8.2%였다. 이때 연소기로 유입되는 CF₄의 유량과 농도는 각각 91 LPM과 2335 ppm이었으며, CH₄ 19 LPM, O₂ 40 LPM을 사용한 연소 반응시 약 96%의 저감 효율을 나타내었다. 상용 스크러버와의 동일 운전 조건에서의 다공성 매체 연소에서의 CF₄ 저감 효율과 전체 에너지 사용 효율 비교시 각각 16%, 41% 이상의 저감 효율 상승과 에너지 절감 효과를 보였다.

주제어 : 과불화합물, 압력 순환 흡착, 다공성 매체 연소, 분해 및 제거 효율

Abstract : The perfluorocompounds (PFCs) emitted from the semiconductor and display manufacture is treated by abatement systems which use various technologies, such as combustion, thermal, plasma, catalyst. However, it is required that the system should overcome their drawbacks with excess energy consumption and low removal efficiency. The new technology using combination of pressure swing adsorption and excess enthalpy combustion for the reduction of PFCs emissions were developed and analyzed its characteristics. PFCs concentration ratio and PFCs loss factor were calculated from measuring concentration of PFCs at the calculated by comparing concentration of PFCs at the combustor's inlet and outlet. There were performance evaluations with various gas flow for comparing energy consumption and removal efficiency with existing equipments. The concentration ratio and the loss factor of PFCs were 1.65, 8.2%, respectively, when the total gas flow of the pressure swing adsorption (PSA) inlet was 204 liter per minute (LPM) and CF₄ concentration was 1412 ppm. In comparison with existing system

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jkchung@gst-in.com; Tel: +82-31-371-2261; Fax: +82-37-371-2320

doi: 10.7464/ksct.2017.23.2.181 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

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.

at constant condition, CF₄ removal efficiency for a porous media combustion (PMC) showed the improvement more than 16% and the consumed energy was also reduced up to approximately 41%. Then, the total gas flow introduced into PMC and CF₄ concentration were 91-LPM and 2335 ppm, respectively, and the destruction and removal efficiency of CF₄ was about 96% at 19-LPM CH₄, and 40-LPM O₂.

Keywords : Perfluorocompounds, Pressure swing adsorption, Porous media combustion, Destruction and removal efficiency

1. 서론

반도체 및 디스플레이 산업에서 사용 후 배출되는 Non-CO₂ 온실가스의 대표 물질로는 CF₄, NF₃, SF₆, C₂F₆, C₃F₈, C₄F₁₀, CHF₃ 등과 같은 과불화합물(perfluorocompounds, PFCs)과 N₂O를 들 수 있다. 이들 물질은 반도체 소자의 제조 공정 중 에칭 및 챔버의 세척 단계 등에서 광범위하게 사용되며, 장기적으로 반도체 및 디스플레이 제품군들의 고집적화 및 대형화 추세로 인해 사용량 또한 증가 할 것으로 예상된다[1-3].

PFCs 저감 기술로는 공정개선을 통한 사용량 절감, 비 온산화 가스의 개발, 회수를 통한 재사용, 처리시설 도입 등 다양한 연구 및 현장 적용이 시행되었으나, 현실적으로 활용도 면에서 배출되는 PFCs를 직접 분해, 제거하는 방식이 널리 사용되고 있다.

PFCs의 주요 분해 기술로는 연소, 열분해, 플라즈마, 전자빔, 촉매 기술 등이 사용되고 있으나 PFCs의 대부분이 화학적으로 매우 안정한 난분해성 물질로서, 낮은 처리 효율 및 에너지 과소비 측면에서 새로운 기술의 개발 또는 기존 기술의 개선이 절실한 실정이다[4-10].

PFCs 저감 스크리버로 유입되는 폐가스에는 PFCs 외에도 생산과정 중 발생된 미세입자, 산성가스 등이 다량 함유되어 있어 스크리버의 압력상승, 운전정지, 부품 수명 저하 등을 야기하고, 분해 반응 후 생성되는 부산물인 F₂, HF, HCl 등의 산성가스와 미세입자는 스크리버의 부식 및 배관 막힘 등과 같은 문제점을 항시 유발하고 있어 PFCs 저감 스크리버는 유입되는 가스와 처리 후 배출되는 가스 모두에 대하여 대응 가능한 기술이 접목되어야 한다. 스크리버의 최종 사용자는 저에너지를 사용한 PFCs의 고효율 분해, 공해물질 배출 저감, 폐수 발생 최소화, 부식 내구성과 운영 안정성, 스크리버의 대용량화, 환경안전 사양 규정 대응과 같은 다양한 사항이 반영된 스크리버를 요구하고 있으며, 시장의 전체적 트렌드 역시 상기 서술한 내용의 기술 개발 및 제품화가 진행 중이다[11].

본 연구에서는 앞서 기술한 다양한 문제점의 해결을 위한 여러 기술이 복합된 형태의 PFCs 저감 스크리버를 개발하였으며, 적용된 기술로는 건식 집진의 전처리 기술, 흡착 농축 기술, 다공성 매체 연소 기술, 습식 고성능 후처리 기술 등이

다. 이러한 복합적 기술이 적용된 상용화 스크리버는 아직까지 없으며, 실 공정 폐가스와 유사한 조성의 모사가스를 사용하여 개발된 스크리버의 에너지 사용량, PFCs 저감 효율 등을 평가하고자 하였다. 또한, 개발 스크리버의 상용화 가능성 평가를 위해 당사의 상용 스크리버인 MK-III와의 성능 비교 분석 실시를 통해 상용 가능성과 장단점 분석 실시로 개선점을 찾고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 스크리버의 구성

실험에 사용된 개발 스크리버는 집진, 흡착 농축, 연소, 습식 후처리 순으로 구성되며 Figure 1에 모식도로 나타내었다. 집진의 경우 통상적인 함진 가스의 여과에 사용되는 필터 백(filter bag)을 이용한 건식 집진기, 흡착 농축은 특정 기체를 흡착하는 흡착제를 이용하여 압력차에 따른 흡착량의 차이를 이용해 가스를 분리하는 압력순환 흡착(pressure swing adsorption, PSA) 컬럼, 연소는 내부 열 재순환을 통한 큰 열복사와 열전도도를 가지는 다공성 매체를 이용한 연소(porous media combustion, PMC) 방법이 적용된 연소기, 습식 후처리는 산성가스와 미세 먼지의 동시 저감을 위한 벤투리 스크리버(venturi scrubber)를 접목하였다. Figure 2에 건식 집진, PSA 컬럼, PMC 연소기, 습식 벤투리 스크리버가 결합된 스크리버의 3D 모델링 형상과 실제 제작된 형상을 나타내었다.

PMC 연소기의 형상을 Figure 3에 나타내었으며, 연소가 일어나는 다공성 매체는 열전도도와 열충격에 대한 저항성과 부식에 강한 저항성을 가진 탄화규소 물질로서 상압 소결법을 사용하여 제작하였다. 상압 소결 탄화규소(Pressureless sintered SiC, PLS-SC) 소재의 경우, 고순도 미분의 SiC 분말을 소결 온도를 낮추면서 치밀화가 가능하고 반응소결 과정에서 기공이 전혀 없는 pore-free 치밀화에 기여하는 잔존 free Si의 양을 현존 제품의 free Si 함량 15% 수준에서 10% 이하로 최소화할 수 있는 기술로서 고온 부식성 분위기 하에서 장기 내구성을 확보할 수 있는 소재라 할 수 있다. 상부 200 Cell, 하부 100 Cell로 크기가 다른 두개의 다공성 허니컴을 적층하는 형태로 구성되며, 허니컴은 단열재와 금속 하우징으로 감

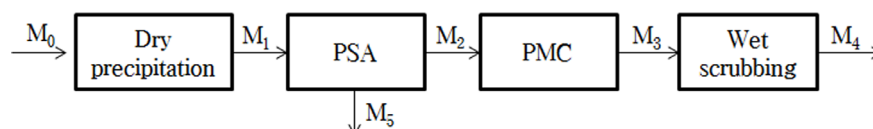
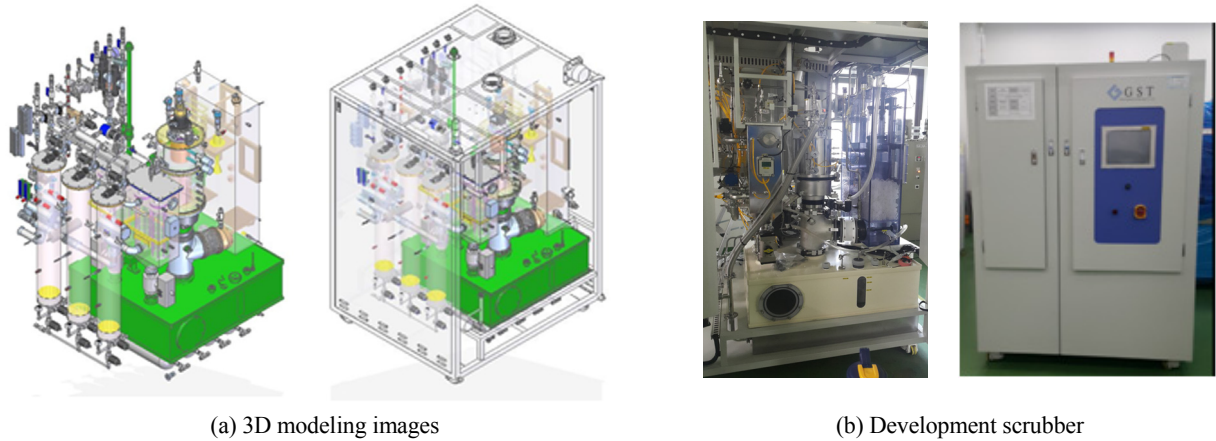


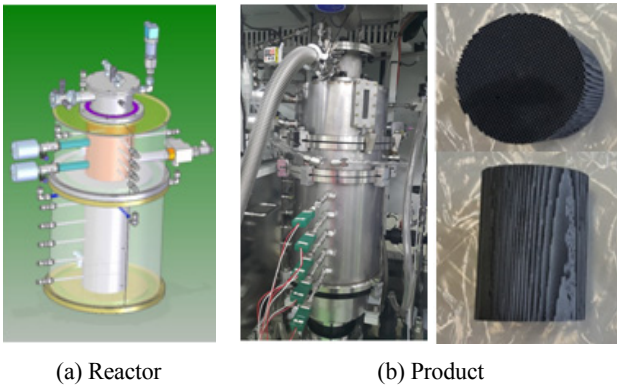
Figure 1. Block diagram of development scrubber.



(a) 3D modeling images

(b) Development scrubber

Figure 2. 3D modeling images and product of development scrubber.



(a) Reactor

(b) Product

Figure 3. Product and image for PMC reactor and inner SiC honeycomb.

짜진 구조이다. 연소를 위한 연료와 산소는 예혼합 형태로 폐가스와 함께 공급되며, 허니컴과 허니컴 사이의 공간에서 연소가 일어나며, 하부 허니컴 후단에서 2차 연소가 진행되는 다단 연소기 형태의 반응기이다. 연소기 후단은 연소 가스의 냉각과 반응 후 생성된 부산물인 HF, F₂ 등의 산성가스를 제거하기위한 습식 후처리 구간으로 NaOH가 혼합된 알칼리성 용액을 사용하여 산성분을 제거한 후 스크러버 외부로 배출하였다.

2.2. 스크러버의 성능 평가

성능 평가에 사용된 가스(CF₄, NF₃, Kr, N₂)는 가스 공급 장치로부터 일정 압력으로 공급되었으며, 각각의 가스는 Linetech Co.의 질량유량계(mass flow controller, MFC)에 의해 정밀 조절되었다. 표준가스 및 반응가스는 Rigas Co.의 99.99% 이상의 고순도 가스를 사용하였으며, 운반가스(carrier gas)로는 액체 질소(N₂)를 기화하여 사용하였다. 연소를 위한 연료는 99.9999%의 메탄(CH₄)과 액체 산소(O₂)를 기화하여 사용하였다. 반응 전후 가스의 유량과 농도 분석은 EL Co.의 isepa 사중극자 질량분석계(quadrupole mass spectrometer, QMS)와

Table 1. The instruments and gas composition used experiment

Item	Quantity	Note
QMS	2	I-Sepa, EL Co., 0 - 200 amu
FT-IR	2	Midac I4000, Midac Co., 15 cm-cell, 1 cm-cell
N ₂	-	100 - 200 LPM
CF ₄	-	1000 - 3000 ppm
Kr	-	1 LPM
CH ₄	-	15 - 50 LPM
O ₂	-	30 - 100 LPM

Midac Co.의 FT-IR I4000을 사용하여 실시간으로 분석하였다. 실험에 사용된 가스의 조성 및 계측기의 운전조건을 Table 1에 나타내었다.

스크러버의 성능 평가는 국립환경과학원에서 권고한 “반도체 & 디스플레이 업종에서 사용되는 온실가스 저감시설의 저감 효율 측정 방법 가이드라인”을 따랐으며[12], 분석에 사용된 장치의 구성과 필요한 계측기 및 부대용품을 Table 2와 Figure 4에 나타내었다.

Table 2. Instruments and accessories for measure to destruction and removal efficiency of scrubber

Item	Quantity
QMS	1 - 2 systems
FT-IR	2 systems
Mass flow controller	1 ea
Calibration equipment	1 systems
Standard gas	-
Antipollution filter	2 ea
Flow rate measurement gas (Kr)	1 cylinder
Diluent gas (N ₂)	1 cylinder

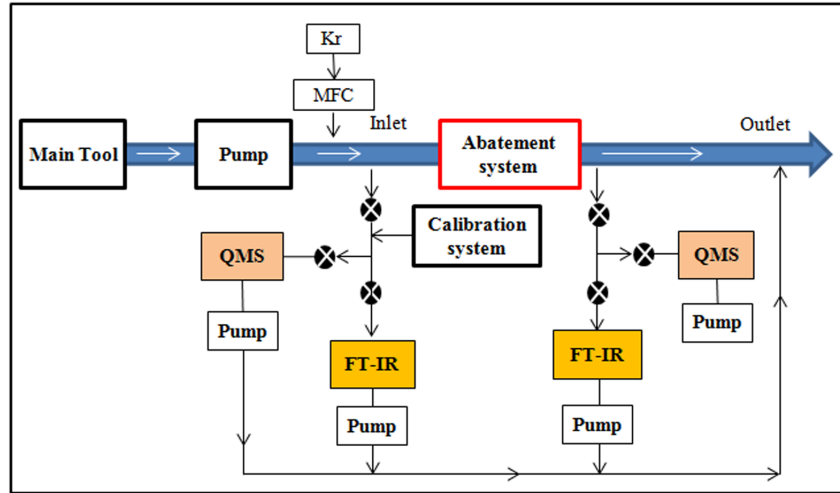


Figure 4. Diagram of sampling guideline suggested by national institute of environmental research for PFCs.

반응 전후의 CF₄ 농도 측정을 통한 분해 및 제거효율(destruction and removal efficiency, DRE)과 희석비는 Equation (1) 과 (2)와 같은 방법으로 계산하였다.

$$\text{F-gas 분해 및 제거 효율(\%)} = \left(1 - \frac{C_o \times DF}{C_i}\right) \times 100 \quad (1)$$

$$DF(\text{희석비}) = \frac{Q_o}{Q_i} \quad (2)$$

여기서, C_i = 연소기로 도입되는 CF₄의 농도
 C_o = 연소기에서 배출되는 CF₄의 농도
 Q_i = 연소기로 도입되는 폐가스의 유량
 Q_o = 연소기에서 배출되는 폐가스의 유량을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PSA 특성

개발한 스크리버의 흡착 컬럼에서의 압력, 연소기로 유입되는 가스의 유량 특성, 농도 분석을 통해 스크리버의 흡탈착 특성을 분석하였으며, Figure 5에 운전 압력과 연소기로 배출되는 가스의 유량 측정 결과를 나타내었다. PSA 성능 평가시 유입된 가스의 조성은 유량 200 LPM, 함유된 CF₄의 농도는 약 1400 ppm이었다. 3개의 흡착 컬럼에서의 흡착시 압력은 약 2 bar로서 컬럼간 균일한 압축과 탈착 성능을 보여 주었으며, 연소기로 유입되는 가스의 유량 또한 60 min 이후 100 LPM 내외로 균일하게 공급되는 특성을 보임으로써 흡탈착 시퀀스를 통한 제어 및 컬럼의 구성이 적절함을 알 수 있었다. 이때 흡착 컬럼을 통한 CF₄의 농도 변화는 유입부 1412 ppm, 농축부 2335 ppm, 배출부 97 ppm으로 농축비(농축부/유입부) 1.65를 나타내었다. 일반적인 흡착 공정에서는 가급적 높은 농축비를 요구하나 본 연구에서는 후단의 연소 반응과 연계된 전체적 에너지 사용량 및 저감효율을 목표로 함으로 인하여 최

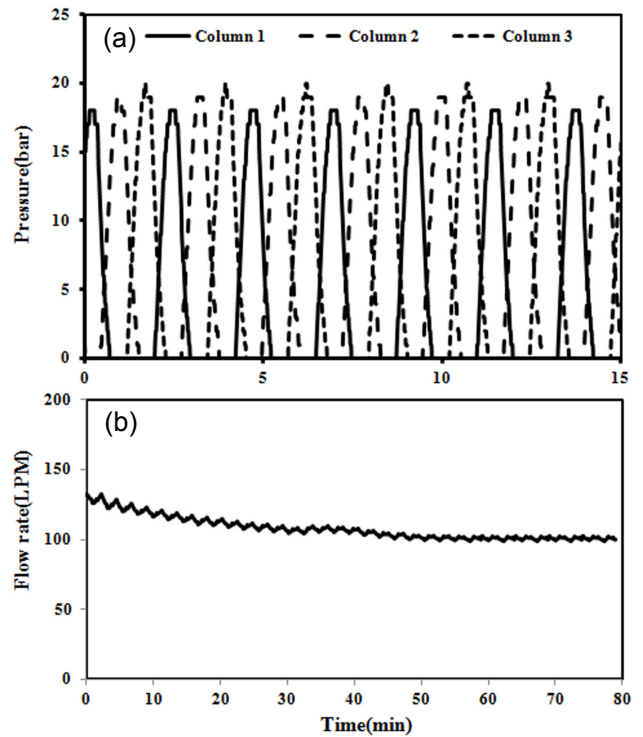


Figure 5. The profile of flow rate into the combustion reactor and pressure at adsorption column : (a) PSA pressure, (b) PSA discharge flow rate.

소의 에너지를 사용하여 목표한 1.6 이상의 농축비를 달성하도록 하였으며, 이때 사용된 전기에너지는 6.8 kW였다.

3.2. PMC 특성

PSA 과정을 거친 후 연소기로 유입되는 CF₄의 농도와 유량은 각각 2335 ppm과 120 LPM이었으며, 연소기에 사용된 CH₄와 O₂의 사용량은 각각 19 LPM과 40 LPM이었다. 연료의 연소와 폐가스 분해가 일어나는 허니컴과 허니컴 사이의 반

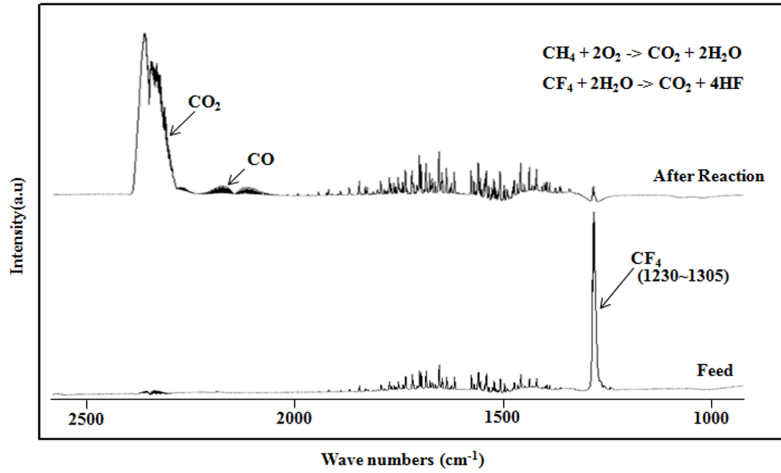


Figure 6. FT-IR spectra of before and after for CF₄ decompose at porous media combustion reactor.

응구간에서의 불꽃 온도는 최대 1600 °C, 최저 1200 °C를 나타내었으며, 평균적으로 1400 - 1500 °C로 나타났다. 최대 온도와 최저 온도차가 큰 이유는 온도 측정을 위해 삽입된 온도계(thermal couple)에서의 화염 노출에 의한 것으로서 화염이 허니컴 내부에서의 유동에 의한 온도 변화로 판단된다. 2단 연소가 진행되는 구간에서의 온도 또한 850 - 1100 °C의 온도 트렌드를 보였다. 이때 연소기를 통해 배출되는 CF₄의 유량과 농도는 각각 200 LPM과 53 ppm으로 약 96%의 저감 효율을 나타내었으며, 반응 후 허니컴 소재의 형상 변화는 시각적으로 구분할 수 없었다.

FT-IR 분석기를 통해 측정된 반응 전/후 CF₄의 스펙트럼을 Figure 6에 나타내었으며, 분해된 CF₄ 성분 외 연소 과정에서 생성된 CO, CO₂의 피크를 확인 할 수 있으며, 분해과정 중 생성이 예상된 HF는 후처리 습식 스크리버에 의한 제거로 인해 본 실험에서는 검출되지 않았다. 동일 조건에서 실시한 상

용 스크리버에서의 CF₄ 저감 효율은 약 80%로서 개발 스크리버에서 16% 내외의 처리 효율 상승을 확인 할 수 있었다.

당사 상용 스크리버인 MK-III와 개발 스크리버의 에너지 사용량 절감 비교를 위하여 Figure 6에서 실시한 동일한 연소 조건을 대상으로 CF₄ 저감 효율 95%를 기준으로 하여 연료 사용량 비교 분석을 실시하였다. 기존 상용 스크리버의 경우 27 LPM, 개발 스크리버는 20 LPM으로 개발 제품에서 약 26%의 연료비 절감 현상을 보였다. 이와 같은 에너지 절감효과는 기존 상용 스크리버에서 가지고 있는 단점인 불꽃 날림, 화염으로부터의 간접적인 열전달에 의한 분해, 화염 불안정성과 같은 현상을 다공성 매체 내에서 연소를 시킴으로 앞서 문제시된 부분의 개선이 가능함을 보여주는 결과로서, PFCs를 포함하는 폐가스가 화염대를 직접 거치면서 직접적인 열전달을 통한 분해 효과와 함께 Kim et al., Qin et al. 및 Lee et al. 등이 제시한 다공성 매체에서의 연소 특성인 내부 열

Table 3. The comparison of combustion technology for existing technique and development technology

	Existing technology		Development technology
	Mixed enhancement method	Cross-flow method	Porous media combustion
Shape			
Property	<ul style="list-style-type: none"> - lowness of removal efficiency by the indirect heat transfer from the flame - Increase of flame instability when high flow intake, due to floated high temperature flame from nozzle - Used of excess energy for removal efficiency increase 		<ul style="list-style-type: none"> - High removal efficiency cause of decomposition by direct heat transfer thereby direct pass of waste gas which contain PFCs through the flame area - Increase of flame stability with excess enthalpy flame by inner heat recycle

재순환에 의한 초과엔탈피 연소를 통한 연소열의 재순환에 의한 에너지 재활용에 의한 결과로 판단된다[9,10,13]. 기존 연소 소각 기술과 개발 기술의 연소 특성 비교를 Table 3에 나타내었다.

3.3. PSA와 PMC 연계 운전 특성

PSA와 PMC의 연계 운전을 통한 가스의 조성, CF₄ 저감 효율을 알아보았다(Table 4, Table 5).

Table 4에 개발 스크러버의 주요 지점에서의 CF₄ 농도와 N₂ 유량을 나타내었으며, 흡착과 연소의 개별 운전과 연계 운동이 동일한 결과를 나타냄으로써 개발한 스크러버가 유기적인 연계 운전에서도 원활히 운전됨을 확인할 수 있었다.

CH₄와 O₂의 사용량이 각각 19 LPM과 40 LPM인 연소조건에서 CF₄의 저감 효율과 이때의 희석비 및 농축 특성 등을 Table 5에 나타내었다. 희석비는 유입되는 N₂ 200 LPM 대비 배출되는 가스의 총합을 비로 나타낸 것으로서 배출되는 가스에는 유입 N₂ 외에 연소에 필요한 연료와 산소 및 후단 연소를 위해 2차로 부가된 산소의 합으로 계산된다. 스크러버의 입구와 출구에서 측정된 과불화합물의 농도로부터 계산된 저감 효율은 95%, 흡착을 통한 농축비는 1.65이며, PSA로 유입되는 CF₄의 질량 대비 배출되는 CF₄의 질량으로 정의되는 CF₄ 손실 계수는 8.2%로 이는 흡착 컬럼에 흡착되지 못하고 배출되는 CF₄의 비율을 의미한다.

Figure 7에 CF₄ 저감 효율 95%를 기준으로 하여 개발 스크러버와 상용 스크러버의 에너지 사용량을 비교하였다. N₂ 200 LPM, CF₄의 농도 1000 ppm으로 폐가스가 공급되었으며, 상용 스크러버의 경우 2 kW의 낮은 전기 사용량에 반해 50 LPM의 연소 연료를 필요로 하였으며, 개발 스크러버는 6.8 kW의 높은 전기 사용량 대비 19 LPM의 낮은 연소 연료 사용량으로 인해 전체적으로 29.5 kW와 17.2 kW의 에너지 사용량을 나타내었다. 결과적으로 개발 스크러버가 낮은 CH₄ 사용량을 기반으로 하여 전체적으로 약 41%의 에너지 절감 효과를 가져왔다. 이는 압력순환흡착을 통해 폐가스 속에 포함

Table 4. CF₄ composition and flow rate at main point by PSA and PMC system interconnection operation

	M1	M2	M3	M4	M5
CF ₄ Conc. (ppm)	1412	2335	107	135	205
Flow rate (LPM)	204	91	120	232	115

Table 5. CF₄ decompound efficiency and dilution ratio by PSA and PMC system interconnection operation

Item	Value
DF (dilution factor)	1.3
F-Gas decomposition efficiency (%)	95
Concentration ratio (M2/M1)	1.65
F-gas loss factor (%)	8.2

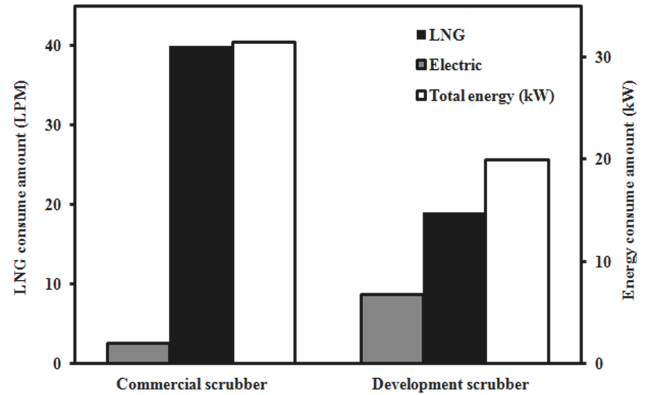


Figure 7. Comparison of the energy consume of the development scrubber and the commercial scrubber.

된 CF₄를 흡착하고 흡착된 CF₄를 일정량의 가스로 탈착함으로써 연소기로 유입되는 가스의 조성을 저 유량, 고농도로 변화시킴으로써 폐가스의 분해에 필요한 온도로 승온하는데 소모되는 에너지를 줄임과 함께 다공성 매체에서의 연소 특성인 내부 열 재순환에 의한 초과엔탈피 연소과정에서의 에너지 저감이 복합적으로 나타난 결과로 유추할 수 있다.

4. 결론

PSA와 PMC가 조합된 새로운 형태의 PFCs 저감 스크러버를 개발 및 특성을 알아보았으며, 이를 상용 스크러버와 비교하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, PSA를 이용한 흡착 공정으로부터 측정된 CF₄의 농축비와 손실률은 각각 1.65와 8.2%로 나타났으며, 적정 농축을 통한 후단 연소기로의 유입량 저감은 CF₄ 분해 효율 증진에 도움을 주었다.

둘째, 다공성 매체 연소는 내부 연소열의 재순환을 이용한 초과엔탈피 연소의 용이함으로 인해 동일 에너지를 사용한 CF₄ 저감 효율 비교시 약 16%의 저감효율 상승과 약 26%의 에너지 절감 효과를 확인하였다.

셋째, PSA와 PMC 연계 운전을 통하여 상용 스크러버 대비 41% 이상의 에너지 절감 효과를 얻을 수 있었으며, 이는 적정 농축과 초과엔탈피 연소의 연계를 통한 결과로서, 두 가지 기술의 최적화를 통해 최저 에너지를 이용한 고효율 PFCs 저감 스크러버의 개발을 완료할 예정이다.

감사

본 연구는 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 Non-CO₂ 온실가스 저감기술개발 사업단(2013001690013)에서 지원받았습니다.

References

1. Lee, J. Y., Lee, J. B., Moon, D. M., Souk, J. H., Lee, S. Y., and Kim, J. S., "Evaluation Method on Destruction and Re-

- removal Efficiency of Perfluorocompounds from Semiconductor and Display Manufacturing,” *Bull. Korean Chem. Soc.*, **28**(8), 1383-1388 (2007).
2. Park, Y. K., “Waste Gas Treatment System for Semiconductor Process,” Environment Technology Development Business, Report the Ministry of Environment (2004).
 3. Greenhouse Gas Inventory and Research Center, “National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea,” (2014).
 4. Chung, J. K., Lee, K. Y., and Kim, D. H. “Device for Purifying Exhausted Gas from Chemical Vapor Deposition,” Korea Patent No. 10-1617691 (2016).
 5. Han, S. H., Park, H. W., Kim, T. H., and Park, D. W., “Large Scale Treatment of perfluorocompounds Using a Thermal Plasma Scrubber,” *Clean Technol.*, **17**(3), 250-258, (2011).
 6. Lee, Y. C., and Jeon, J. K., “A Study on Catalytic Process in Pilot Plant for Abatement of PFC Emission,” *Clean Technol.*, **18**(2), 216-220 (2012).
 7. Jeong, S. H., Han, J. H., Lee, S. J., and Lee, M. J., “Studies for Discomposing Characteristic of PFCs Fluid with the Plasma Torch,” 30th KOSCO Symposium, 141-146 (2008).
 8. Ryu, J. Y., Son, Y. I., and Jang, S. H., “A Study on Decomposition and By-products of PFCs using Electron-beam,” *J. Korea Soc. Waste Manage.*, **32**(1), 1-6 (2015).
 9. Kim, S. G., Lee, D. K., and Noh, D. S., “An Experimental Study of Image Dilution Effects on Image-Image Flame Stabilization Characteristics in a Two-section Porous Medium,” *Appl. Therm. Eng.*, **103**, 1390-1397 (2016).
 10. Qin, L., Han, J., Wang, G., Kim, H. J., and Kawaguchi, I., “Highly Efficient Decomposition of CF₄ Gases by Combustion,” Science Research, Conference on Environmental Pollution and Public Health, 126-130 (2010).
 11. Chung, J. K., “Process Equipment Emission Control Technology,” 3th Forums on Cleanroom Contamination Control for Next Generation, Korea Air Cleaning Association (2016).
 12. National Institute of Environmental Research, “Guideline for Measurement Method of Destruction and Removal Efficiency of Greenhouse Gas Abatement System Using at Semiconductor and Display Manufacturing,” (2015).
 13. Lee, D. K., Kim, S. G., Noh, D. S., Ko, C. B., and Guahk, Y. T., “Energy-saving Combustion Apparatus for Incineration Disposal of Non-degradable Noxious Gases, and Operation Method Thereof,” PCT/KR2015/002964 (2015).