

고온 아크 플라즈마를 이용한 고농도 VOCs 제거 기술 개발

홍승혁^{a†} · 김재강^b · 이주열^b

(주)코리아테크 기술연구소^a, (주)에니텍 기술연구소^b
(2017년 2월 24일 접수: 2017년 3월 24일 수정: 2017년 3월 29일 채택)

Development of arc plasma for removal of high concentration VOCs

Seung Hyouk Hong^{a†} · Jae Gang Kim^b · Joo Yeol Lee^b

^aTechnology Institute, Korea-tech Co., Ltd, 23, Jeonpa-ro, 62Beon-gil, Manan-gu,
Anyang-si, Gyeonggi-do, 430-857, Korea

^bITechnology Institute, Anytech Co., Ltd, 101-1301, Digital Empire II, 88,
Sinwon-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 443-734, Korea

(Received February 24, 2017; Revised March 24, 2017; Accepted March 29, 2017)

요약 : VOCs는 인체에 치명적인 질환을 유발하는 물질로써 도장공정중 발생하는 양이 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 일반적으로 소형 도장시설에서 발생하는 VOCs를 처리하는 방법으로 활성탄 흡착 또는 흡착 후 연소 및 촉매 산화법 등을 사용하고 있다. 하지만 활성탄 교체주기, 재생시설 및 재생주기 등을 예측하기 어려워 새로운 처리방법이 필요하다. 비이송식 플라즈마 시스템을 이용한 VOCs 제거방법은 일반 연소과정이 아닌 고전압 아크 방전에 의한 고온 플라즈마 유동 발생 기술을 이용한 제거방법으로 화학반응이나 오염이 없는 고순도의 고온 열처리 및 열분해가 가능하다. 본 연구에서는 고온 아크 플라즈마 시스템을 이용하여 특수 환경오염물 및 VOCs 가스 열처리 공정의 핵심기술로 활용하여 작동 가스 유량 변화에 따른 VOCs 처리 효율 및 플라즈마 전력량에 따른 처리 효율을 측정하였다. 또한 유해가스 처리효율성 증대를 위해 플라즈마 반응기를 최적화하여 제작하였으며 성능을 파악하였다.

주제어 : 도장, 아크 플라즈마, 반응기, 휘발성유기화합물, 제거

Abstract : Generally, there are three ways to remove VOCs from the small painting booth: adsorption, burn and oxidation catalyst. RTO and RCO are high efficiency methods for removing VOCs. But they require large installation areas, which are not suitable for the small painting booth. And we need a new removing method because it is difficult to predict the A/C changing time and the recycle time. To solve these problems, we have developed the Arc plasma system which is simple and enable consecutive-use. It removes VOCs effectively and eco-friendly. In this study we have investigated the enrichment material and VOCs removal efficiency.

Keywords : Painting, Arc Plasma, Reactor, VOCs, Removal

[†]Corresponding author
(E-mail: seunghyook.hong@korea-tech.co.kr)

1. 서론

전 세계적으로 급격한 산업사회의 발전과 더불어 환경의 파괴가 급격히 진행되고 있다. 인간의 삶의 질 향상과 쾌적한 환경에 대한 욕구로 세계적으로 환경규제를 위해 많은 연구와 노력이 진행되고 있고, 특히 유해가스 제거를 위해 각 국가가 경쟁적으로 앞장서고 있다. 유해가스 중 휘발성 유기화합물(VOCs: volatile organic compounds)은 악취를 동반한 인체 및 동식물에 매우 유해한 가스이며 지구 온난화와 광화학 스모그의 원인이다[1].

도장(coating)은 많은 산업에서 공통적으로 필요한 공정이며 제품의 외형과 품질을 결정하는 매우 중요한 공정이다. 다양한 산업적 필요에 의해 도장공정을 운영하고 있으나 도장공정 중 사용되는 대다수의 도료에는 많은 양의 휘발성 유기화합물을 포함하고 있어 도장부스에서 발생하는 배기가스에는 다량의 VOCs가 포함되어 있는 실정이다. 문헌 조사에 따르면 도장공정중 배출되는 VOCs는 약 397천톤으로 전체 산업의 41.6%를 차지할 정도로 비중이 크다[2,3].

VOCs를 제거할 수 있는 기술은 크게 처리기술과 회수기술로 나누어지며 처리기술에는 소각과 생물학적 기술이 있고 회수 기술에는 농축 및 흡착 기술 등이 있다[4]. VOCs 처리기술 중 흡착 기술은 흡착제의 주기적인 교체에 따른 비용 발생과 흡착제의 재사용시 일반적으로 고온의 열 처리에 의한 탈착을 채택함으로써 유지관리에 있어 비용이 많이 소요된다[5,6]. 또한 생물학적 방법은 온도변화에 따른 미생물의 유지관리가 필요하며 넓은 설치 부지를 필요로 하는 문제점이 있다. 연소에 의한 제거 방법은 연소시간이 길어져 보조연료비가 매우 많이 필요하며 부산물이 생성되고, 촉매 연소에 의한 제거의 경우 상대적으로 낮은 온도에서 산화되기 때문에 연소로 인한 질소산화물 발생량은 낮으나 촉매독 주의가 크게 필요하며 효율성이 낮다[7,8]. 이에 반해 고농축시킨 VOCs를 고온으로 제거할 경우 처리시간이 짧아 부산물 발생량을 감소시킬 수 있으며 설치면적 감소로 시스템 제작비용을 절감할 수 있다. 또한 자동화 시스템에 의한 작동으로 구동의 편리함 및 운영 효율이 높은 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 VOCs 중 많은 비중을 차지하고 있는 톨루엔을 대싱가스로 선정하였으며 중소형 도장공정에 직접 적용하기 위한 고온 아크 플

라즈마를 이용한 고농도 VOCs 제거 기술의 가능성을 검토하고, 플라즈마 시스템을 제작하여 VOCs 제거 효율 연구를 수행하였다.

2. 실험

2.1 VOCs 제거용 아크 플라즈마 시스템 제작

2.1.1. 아크 플라즈마 토치 제작

실험에 사용된 아크 플라즈마 시스템은 비이송식 아크 플라즈마로 각 구성부품의 교환이 용이하도록 양극부, 음극부, 절연부, 공급부 등 크게 4부분으로 나누어 설계되었으며 발생하는 플라즈마의 특성과 토치의 성능에 영향을 미칠 것으로 예상되는 양극 노즐의 거리를 고려하여 설계하였다. 토치 규격은 160mm×180mm로 토치바디, 음극터미널, 가스링, 냉각수 분배기, 노즐캡, 바디 플랜지, 음극너트, 음극 홀더 및 노즐 냉각수 분배기로 형성되어있다[9]. 토치내부에 자석을 삽입하여 로렌츠포스의 작용을 이용해 전력을 상승시키고 노즐의 안정성을 구현하였다. 실제로 구현된 로렌츠포스 방정식(식(1))은 다음과 같이 요약해 볼 수 있다. 로렌츠포스 식에서 B는 자기장을 나타내며 vq는 자기장 B안에서 속력 v로 움직이는 전하q를 나타낸다.

- Lorentz' force

$$F=Bvq \quad (1)$$

Fig. 1은 아크 플라즈마 토치의 구조를 보여주는 단면도 및 제트 화염이 발생하는 사진으로 높은 파워에 따른 고전압을 유지시켜주기 위해 양극과 음극의 거리를 증가시켰으며 발열에 의한 토치손상을 제어하기 위해 냉각수 유속을 증가시키는 구조를 통해 냉각 효율을 높였다. 제작이 완료된 아크 플라즈마 토치의 냉각수 유량은 주입압력이 10kgf/cm² 일 때 대략 20L/min 이상이 유지됨을 확인하였다. 냉각수 공급온도를 15°C로 설정한 후 플라즈마 토치의 전력을 30kW로 발생시켰을 때 배출되는 냉각수 온도를 확인한 결과, 35°C 내외였고 플라즈마 시스템의 안정성을 확인하였다.

2.1.2 플라즈마 반응기 제작

본 연구의 고찰대상인 아크 플라즈마 반응기의

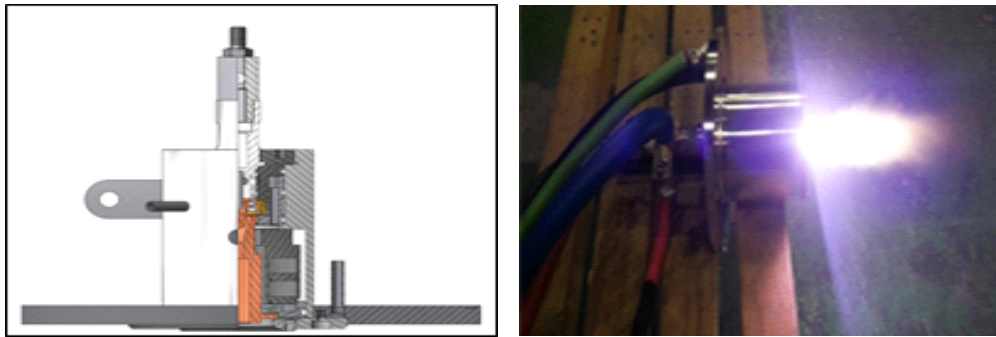


Fig. 1. Arc plasma torch image and picture.

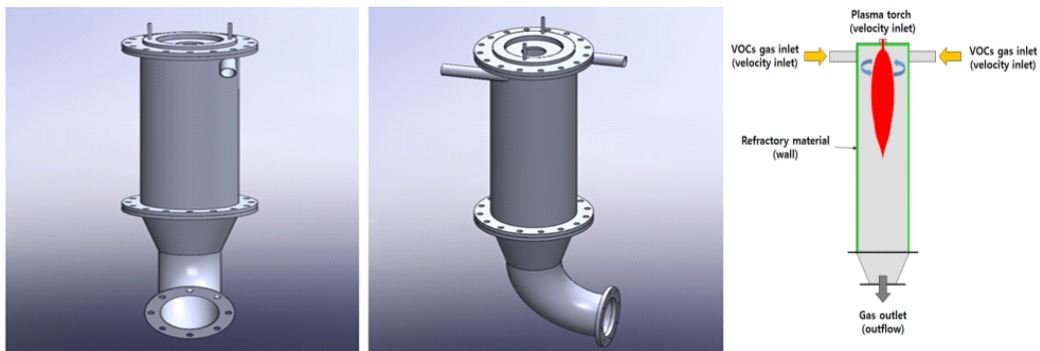


Fig. 2. Plasma reactor 3D design and diagram.

형상은 VOCs 주입시 반응기 내부에서의 가스 체류시간, 선속도 및 온도 프로파일 등을 CFD 해석 시뮬레이션을 통해 최적화된 설계조건을 고려하여 제작하였다[10]. 토치의 화염부가 VOCs 가스와 반응하면서 길이가 증가될 것을 감안하여 1m로 설계하였으며 또한 CFD 결과를 통해 가스 유입구가 2개일 때 가스 유동이 안정적으로 소용돌이 현상이 발생하는 것을 확인하였으며 소용돌이 현상으로 인해 VOCs가 반응기 내부에 체류하는 시간이 증가하여 처리 효율도 높아질 것으로 판단하여 Fig. 2에 도시한 바와 같이 2개의 유입구가 접선방향으로 장착되어 있는 원통형 사이클론 형태의 반응기를 설계에 반영하여 제작하였다.

반응기 내부로 유입된 VOCs가 고온의 분위기에서 연소반응이 활발하게 이루어지고 플라즈마 화염에 의해 발생된 열이 외부로 유출되지 않도록 반응기 내부에 단열재를 입혔다. 단열재는 캐스터블 내화물로, 물을 첨가하여 반죽을 만들어

일정한 틀에 고정시켜 건조시키면 경화되어 내화물이 만들어지는 방식으로 반응기의 곡면에 사용되기 적합하다. 입도가 조정된 내화성 골재와 적절한 결합재를 첨가 배합하는 방법을 사용했고 수분 또는 특정의 액체를 첨가, 혼련, 시공하여 내화 구조체를 형성하였다. 캐스터블 소재는 열전도율이 낮고 가열 후 선변화율이 낮은 HACT-160 소재를 사용하였다. Table 1.은 사용된 캐스터블의 소재 특성을 나타낸 것이다.

Fig. 3은 플라즈마 토치 및 반응기를 결합한 사진으로 VOCs가 반응기 내부에서 접선방향으로 유입되도록 제작하였고 농축시스템에서 반응기까지 배관연결이 용이하게 플랜지로 연결할 수 있도록 하였다. 반응기 상부 플랜지에서 발생하는 고온을 제어하기 위해 냉각수 이송펌프 및 수조를 반응기를 고정시키는 프로파일에 부착할 수 있도록 제작하였다.

Table 1. Physical properties castable materials

Items		High Alumina			
Properties		HACT-180	HACT-170	HACT-165	HACT-160
Max. Limited Temp		1800	1700	1650	1600
Chemical Analysis (%)	Al ₂ O ₃	93	65	58	53
	SiO ₂	-	30	36	40
Thermal Conductivity (kcal/m·h·°C)	260°C	0.93	0.71	0.65	0.67
	540°C	0.99	0.77	0.75	0.68
	800°C	1.04	0.83	0.86	-
Permanent Linear Change (%)	110°C × 24hrs	-0.03	-0.03	-0.06	-0.06
	1350°C × 3hrs	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1
	1500°C × 3hrs	-0.2	-0.35	-0.4	-
Characteristics and Main Applications	Volume stability, Abrasion resistance, Corrosion resistance, Gas resistance, High Temp. furnace	Spalling resistance			
		Corrosion resistance. Various furnace, Torpedo car.			



Fig. 3. Plasma torch and reactor assembly.

2.1.3 농축 시스템 제작

본 연구에 사용된 농축 시스템은 흡착/농축기술을 바탕으로 농축장치를 설계하였으며, 흡착제 충전부, 탈착용 히터로 구성하였다. Fig. 4는 열풍 방법을 이용한 농축시스템 모식도 및 제작된 농축시스템 사진으로, 탈착공정에서 소량의 고온 열풍을 농축챔버 내부로 열원을 공급하여 흡착된 VOCs를 탈착시키며, 챔버 외벽에 설치한 히팅자켓은 내부로 유입되는 열풍과 동시에 농축챔버

내부에 있는 활성탄까지 열을 공급하고 외부로 빠져나가는 열손실을 줄이는 역할을 할 수 있도록 설계 및 제작하였다. 또한 A, B챔버 형태로 교차 운전이 가능하여 24시간 연속운전이 가능하며 자동 개폐를 우선으로 수동 작동도 가능하게 설계 및 제작하였다. 본체의 외형에 대한 설계 계산 및 근거는 아래와 같은 식(2)~(6)을 이용하여 계산하였다[11].

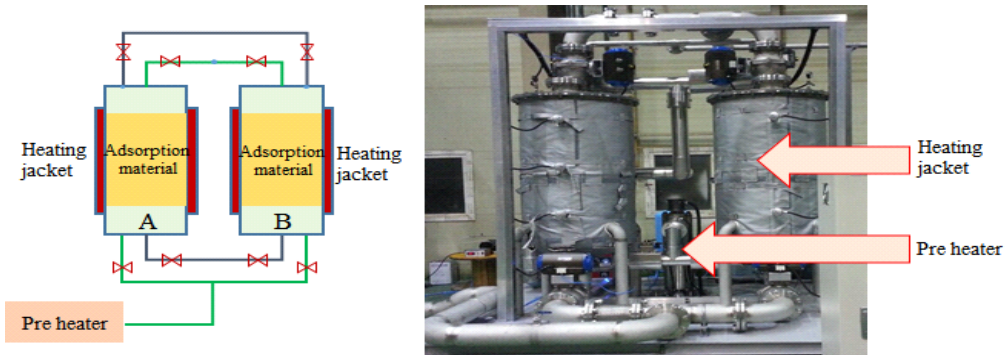


Fig. 4. Schematic diagram of VOCs concentrator.

- 공탑선속도 (Passing velocity)의 결정

$$V_p = 0.3 \sim 1.0\text{m/sec} \quad (2)$$

흡착탑 내의 공탑속도는 흡착제의 비산방지와 흡착효율을 고려하여 0.3~1.0m/sec의 범위 내에서 설계한다. 흡착효율의 제고를 위하여 0.5m/sec로 선정하여 설계하였다.

- 흡착소요 면적

$$A = Q/V_p \quad (3)$$

- 활성탄 충전 높이 (Bed depth)

$$H = V_p * t \quad (4)$$

- 활성탄 소요량 (W)

$$W = A * H * \delta \quad (5)$$

- 활성탄 교체주기 (T)

$$T = (3.74 * 10^9 * W * S) / c * Q * M * G \quad (6)$$

2.2 흡착제 흡착 특성 평가 방법

본 연구에서는 VOCs를 고농축시키기 위해 배출가스와 고품의 흡착제가 접촉하면서 흡착제 표면에 배출가스를 포집하는 방법을 사용하였으며, 이때 고품의 흡착제 성능이 매우 중요한 요소로 작용된다. 따라서 최적의 흡착제를 선정하기 위해 Fig. 5에서 보는 바와 같이 흡착소재 흡탈착 특성 평가용 실험용 농축챔버를 제작하였다. 실험용 농축챔버는 히팅을 제어 할 수 있는 온도 제어기, 흡착소재를 담지 할 수 있는 챔버, 일정한 양의 가스를 유입할 수 있는 MFC(mass flow controller)로 구성하였다. 실험용 농축챔버를 사

용해 흡착제 종류에 따른 흡착특성 평가를 수행하였다. 선정된 실험용 흡착제로는 일반적으로 사용되고 있는 활성탄 야자계와 석탄계, 조립활성탄, 제올라이트 4A 및 13X를 사용하였으며, 75mL 부피의 챔버에 흡착제를 충전 후 톨루엔 배출 유량 5L/min, 유입농도 450ppm의 동일한 조건에서 흡착 실험을 진행하였다.

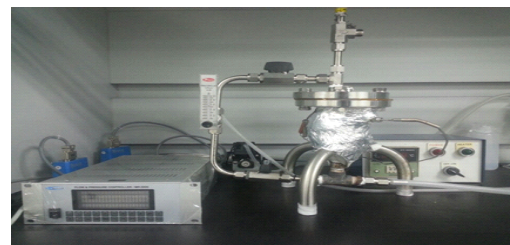


Fig. 5. Adsorption experiment equipment.

2.3 톨루엔 제거 실험 방법

본 실험에서는 Fig. 6과 같이 아크 플라즈마에 의한 톨루엔 가스의 제거실험을 진행하였다. 액상의 톨루엔을 버블링 공정 통해 기화시켜 농축시스템으로 배출시켰고, 과 농축된 VOCs를 탈착하여 3m³/min으로 일정하게 아크 플라즈마 반응기에 주입시켰다. 플라즈마 시스템의 전류, 작동가스의 유량변화, 톨루엔 가스의 유입농도 및 유기용제의 종류에 따른 제거효율 변화를 비교하였다. 제거물질인 톨루엔 가스의 유입농도는 6100ppm, 9750ppm, 12000ppm으로 변화시킨 후 플라즈마 시스템의 전력을 19.8kW ~ 33kW로 증가시키면서 VOCs가 제거되는 변화를 가스 크로마토그래피를 이용하여 분석하였다.

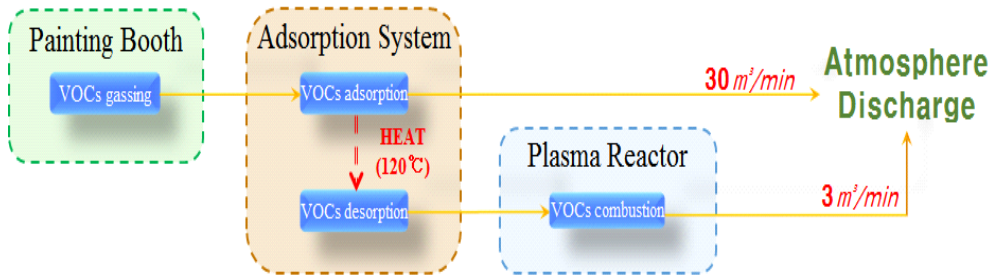


Fig. 6. Process sequence of arc plasma system for VOCs removal.

3. 결과 및 고찰

3.1. 아크 플라즈마 시스템 전력 측정

Fig. 7은 아크 플라즈마 시스템의 작동가스인 질소가스 유량 및 전류 변화에 따른 전력을 측정 한 결과이다. 전력 측정기기(Tektronix PA 1000)를 플라즈마 시스템 파워 서플라이 출력단에 연결한 후 아크 플라즈마 가동 후 발생하는 전력을 측정하였다. 질소가스는 60L/min, 70L/min, 80L/min으로 변화시켰으며 전류는 180A에서 300A까지 증가시켰다. 측정결과, 60L/min, 70L/min을 주입할 경우 전류량이 증가하여 전력이 높아졌으나 80L/min을 주입했을 때에는 상대적으로 전압이 감소하는 것을 확인하였다. 이는 이미 아크 기동의 수축이 충분히 이루어진 상태에서 아크 전류가 커지면서 저항이 작아지며 전기 전도도가 향상되어 아크 전압이 감소하는데 기인한 것으로 아크의 전류 밀도가 낮아지면서 발생된 현상이라고 판단된다[12].

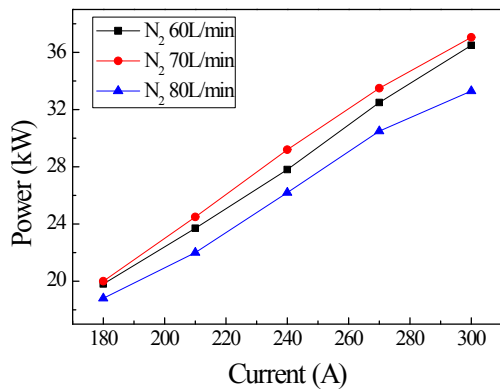


Fig. 7. Electric power of Plasma system for various N₂ gas

3.2. 흡착제 종류에 따른 흡착 특성 평가

흡착 실험 결과, 아래 Fig. 8과 같이 활성탄 계열은 약 150분, 제올라이트는 약 30분 후 파과점에 도달하는 것을 확인하였다. 활성탄은 흡착제 중 최대의 비표면적을 갖고 있고 마이크로 기공으로 되어 미세공 구조가 고도로 발달하여 있기 때문에 우수한 흡착 성능을 가지고 있는 것을 확인 할 수 있었다[13,14].

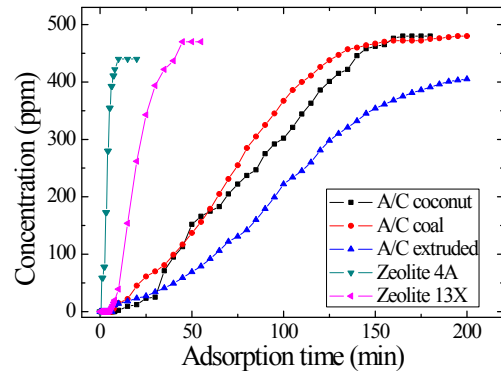


Fig. 8. Adsorption concentration of adsorption material

3.3. VOCs 제거 실험

아크 플라즈마 시스템 전력, 톨루엔 가스 유입 농도 및 VOCs 가스 종류에 따른 제거효율 변화를 비교하였다. 실험방법은 톨루엔 가스 유입농도를 6100ppm, 9750ppm, 12000ppm 으로 변화시키며 플라즈마 시스템 전력은 19.8kW ~ 33kW로 증가시키면서 VOCs가 제거되는 변화를 분석하였다. Fig. 9와 같이 아크 플라즈마에 인가되는 전력이 증가할수록 톨루엔의 농도가 낮아지는 것을 확인하였다. 또한 주입되는 톨루엔의 농도가

높을수록 처리효율이 증가하는 것을 확인하였으며 이는 주입된 연료가 플라즈마 화염의 용량을 증가시켜 제트화염의 크기를 키워 온도 및 가스 와 화염의 접촉면적을 넓혀주는 효과를 발휘하기 때문이라고 판단된다. 이러한 플라즈마를 이용한 화염증폭기술을 적용하였을 때 초고온으로 유해 가스를 제거하기 때문에 부산물 발생량을 줄일 수 있어 2차적인 오염에 대한 부분을 해결할 수 있다[15]. 유기용제에 따른 제거 효율 실험 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 톨루엔 제거효율 97%, 자일렌 제거효율 96%, 벤젠 제거효율은 92%로 VOCs 물질 중 대표적인 BTX 모두 제거 효율이 높은 것을 확인하였다.

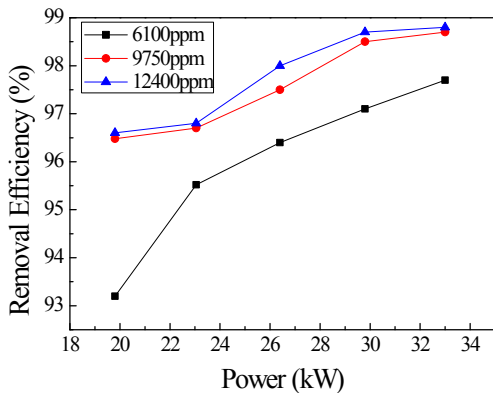


Fig. 9. VOCs removal efficiency of various toluene concentration and permit electric power

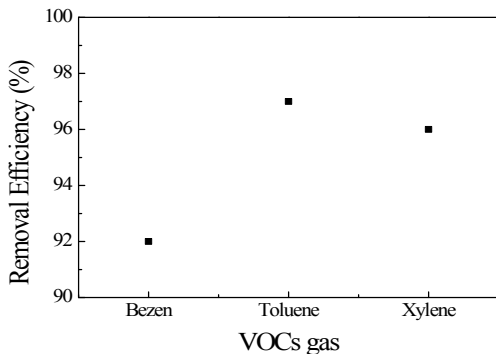


Fig. 10. VOCs removal efficiency of various VOCs gas

4. 결 론

본 연구에서는 30kW급 아크 플라즈마를 이용하여 톨루엔의 제거효율에 대한 평가를 하였다. 처리 효율을 높이기 위해 고농축 시킨 톨루엔을 탈착하여 배출하였으며 최적화된 반응기를 제작하여 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전력 대비 제거효율을 구하기 위한 실험에서는 전체적으로 볼 때 전력의 증가에 따라 VOCs의 제거효율이 증가하였다. 특히 30kW 이상에서 95% 이상의 제거 효율을 보여주었다.
2. 톨루엔 유입농도가 높을수록 제거효율이 증가하는 것을 확인하였다. 이는 유입된 톨루엔이 연료 역할을 해 아크 플라즈마의 제트 화염 크기를 키워 온도 및 접촉면적을 넓혀주는 효과라고 판단된다.
3. 유기용제에 따른 VOCs 제거 효율 결과, 분해시키기가 힘든 화합물들임에도 불구하고 90% 이상의 효율로 제거시켰다는 것은 다른 분해시키기가 어려운 화합물 또한 분해시킬 수 있는 가능성이 있다고 판단된다. 아크 플라즈마 시스템은 휘발성 유해가스 이외에 농축산 오염물질, 병원성 폐기물 및 요즘 사회적 이슈가 되고 있는 다이옥신 같은 화합물을 분해하는 실험에도 이용될 수 있다고 판단된다.
4. VOCs를 700°C 이상으로 소각하면 무연탄처럼 무취화되며, 다이옥신과 같은 환경화학물질이 발생하게 된다. 그러나 1,200°C 이상이면 완전 연소가 되어 무해화된다. 플라즈마 화염은 3,000°C ~ 4,000°C까지 올라가기 때문에 다이옥신을 발생량을 현저히 줄일 수 있는 매우 친환경적인 기술이라 할 수 있다.

본 연구를 통해 도장부스에서 발생하는 VOCs를 제거함으로 소형 도장공정에서 빈번하게 일어나는 작업자의 건강상의 피해 및 생산성 저하를 낮출 수 있고 주거지에 위치한 특성으로 많은 민원사례가 발생하는 것도 줄일 수 있을 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 민·군기술적용연구사업의 “고농도 VOCs 분해용 고온 아크 플라즈마 개발” 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다. (과제번호 : 15-SF-EN-05)

References

1. Lee, J.Y., Song, H.J., Lee, S.B., Kim, M.H. and Jo, Y.M., “Catalytic Oxidation of Toluene over Pd-Activated Alumina Catalysts at Low Temperature”, *J. of Korean Oil Chemists' Soc.*, 29(2) 339-347 (2012).
2. Kim, K.J., Park, J.M., Kwon, O.S. and Song, D.J., "A Development of VOC Control Technology for Small Surface Coating", *National Institute of Environmental Research* (2008).
3. Lee, C., Cha, S.W. and Lee, T.K., “Activated Carbon-Photocatalytic Hybrid System for the Treatment of the VOC in the Exhaust Gas from Painting Process”, *J. of Energy's Soc.*, 14(2) 133-139 (2005).
4. Park, O. H., Park, S. H., Han, J. H. and Jung, I. G., “An Experimental Study on the Treatment of VOC Gases using Microorganism (1) - Toluene Treatment”, *J. of Korea Society of Environmental Engineers*, 22(8) 1417-1427 (2000).
5. Kim, J.Y., Yoon, S.M., Park, K.I., Yoon, S.K., Kil, I.S., Park, H.J., and Rhee, Y.W., "Investigation on Desorption Characteristics of VOCs Adsorbed on used Activated Carbons Collected from Painting Parocess", *Korean Chem. Eng. Res.*, 48(6), 752-756 (2010).
6. Lim, S.I., Kim, N.J., Kim, S.M., Lee, S.H. and Kim, S.U., "Development of VOCs Treatment Technology using High Efficiency Hybrid System with Multi-Scrone", *Korean Society of Environmental Engineers*, 31(7), 491-498 (2009).
7. Kim, M.H. and Lee, H.S., "Crystallinity of CrOx/TiO₂ Catalysts and Their Activity in TCE Oxidation", *Journal of Environmental Science International*, 23(5) 829-837 (2014).
8. Kosusko M., and Nunez C.M., "Destruction of volatile organic compounds using catalytic oxidation", *J. Air Waste Manage. Assoc*, 40, 254-259 (1990).
9. Kim, K.T., Kim, D.G., Lee, D.H., Hur, M. and Song, Y.H., “Improvement of Plasma Reactor Performance for Waste Gasification”, *The Korean society of Mechanical Engineers*, 11, 3821-3825 (2010).
10. Park, M.J. and Jo, Y.M., “Numerical simulation of VOC decomposition in an arc plasma reactor”, *J. of Korea Academia-Industrial*, 17(8), 1-7 (2016).
11. Lee, S.H., Lim, J.W., Rhim, Y.J., Kim, S.D., Woo, K.J., Son, M.J., Park, H.J., Seo, M.C. and Ryu, S.K., “Design Standard of Activated Carbon Vessel for the Intermittent Emission Sources of Volatile Organic Compounds”, *J. of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(2), 250-260 (2007).
12. Seo, K.J., Cho, K.H., Kim, Y.B. and Lee, H.H., “A Study on Voltage-Current characteristics of High-Voltage · Current Pulsed Discharge”, *The Korean Institute of Electrical Engineers*, 7, 1981-1983 (2007).
13. Kim, Y.S., “SO_x Removal using Activated Carbon Additive in FGD and Waste Incinerator Proces”, *J. of Korean Society of City Environment*, 1(1), 85-92 (2001).
14. Kang, S.W., Min, M.H. and Suh, S.S., “Breakthrough Behavior of Benzene and Toluene in Adsorption Bed”, *J. of Korean Oil Chemists' Soc.*, 17(2) 83-88 (2000).
15. Kim, J.H., “Toluene Decomposition by Atmospheric Microwave Plasma Torch”, *Ajou University, Master's Thesis* (2003).