

연구결과보고서

2017년도 연구개발사업에 따라 연구 중인 “저온축매를 이용한 미세먼지 및 악취 동시 배출업종에 적합한 저탄소 하이브리드형 처리기술 개발”에 관한 연구의 최종보고서를 붙임과 같이 제출합니다.

붙임 : 최종보고서 30부. 끝.

연구기관 : 이아이씨티(주)

연구책임자 : 박 종 호 (인)

연구기관장 : 박 종 호 직인

안산녹색환경지원센터장 귀하

제 출 문

안산녹색환경지원센터장 귀하

본 보고서를 “저온축매를 이용한 미세먼지 및 악취
동시 배출업종에 적합한 저탄소 하이브리드형 처리
기술 개발”에 관한 최종보고서로 제출합니다.

연구기관명 : 이아이씨티(주)

연구책임자 : 박 종 호 대표이사(이아이씨티(주))

연 구 원 : 임수길, 윤석경, 김옥현, 문두찬, 신우정,
박용호, 강태양, 장순규

저온촉매를 이용한 미세먼지 및 악취 동시
배출업종에 적합한 저탄소 하이브리드형
처리기술 개발

박 종 호

안산녹색환경지원센터

요 약 문

I. 연구개요

□ 과제명 : 저온촉매를 이용한 미세먼지 및 악취 동시 배출업종에 적합한 저탄소 하이브리드형 처리기술 개발

□ 사업기간 : 2017. 4. 3 ~ 2017. 12. 31 (9개월)

□ 연구개발비

○ 총액 : 100,000천원

- 센터지원금 : 70,000천원

- 기업부담금 : 30,000천원(현금 12,000천원, 현물 18,000천원)

□ 사업수행기관 : 이아이씨티(주)

□ 연구책임자

○ 직책 : 대표이사

○ 성명 : 박종호

II. 연구의 필요성 및 목적

□ 연구의 필요성

○ 연구의 배경

- 악취 배출업체의 소규모화 및 영세화로 15인 미만 사업장 증가

- 미세먼지 및 악취물질 동시 배출사업장의 동시 처리방법의 한계

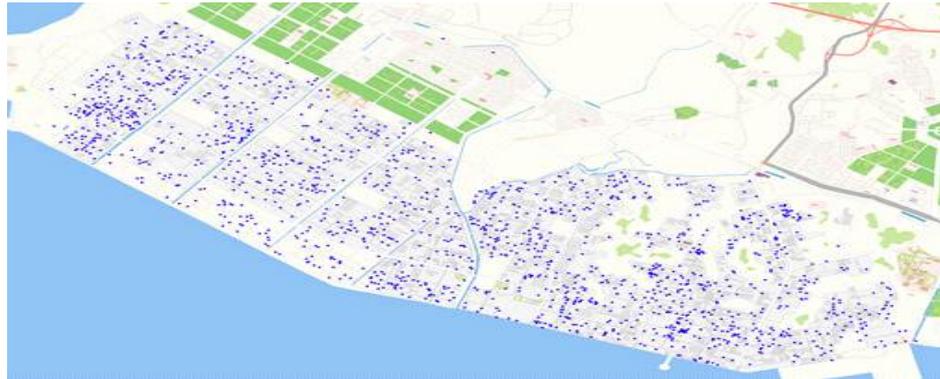
- 안산시 악취민원 중 원인불명의 악취건수가 늘어나고 있음

○ 연구의 필요성

- 대부분의 사업장이 도심부와 떨어진 장소에 위치해 있음에도 불구하고 악취 방지시설의 처리효율이 매우 낮아 고농도 악취가 장거리 확산되어 악취관련 민원을 일으키고 있는 실정임

- 입자상 물질 및 악취물질을 효율적으로 동시처리가 가능한 기술개발 필요

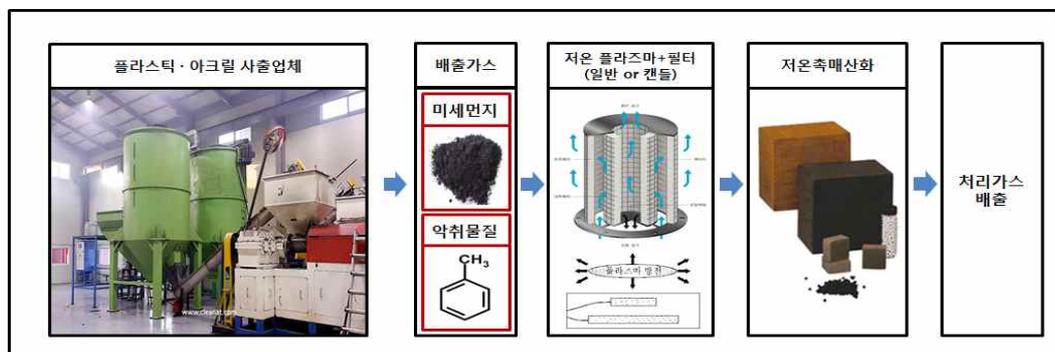
- 본 연구는 기존 활성탄 흡착탑의 문제점을 해결하면서 에너지 사용량이 적고, 미세먼지와 악취물질을 동시에 처리되는 경제적으로 효율적인 기술을 개발하고자 함



<그림 1> 안산시흥 스마트허브 업체현황(1,931개, 2013년 기준)

□ 연구의 목적

- 연구개발 최종목표
 - 저온축매와 입자 제거기술 융합형 악취 및 미세먼지 동시 처리기술 개발
- 연구개발 세부목표
 - 설비의 유지관리가 용이하고 운전비가 저렴한 처리기술 개발
 - 대기환경보전법 및 악취방지법 기준을 만족하는 수준까지 배출가스 처리
 - 입자상 물질, 악취물질의 동시처리가 가능한 저비용 고효율의 상용화 설비 설계(안) 도



<그림 2> 연구개발 세부내용

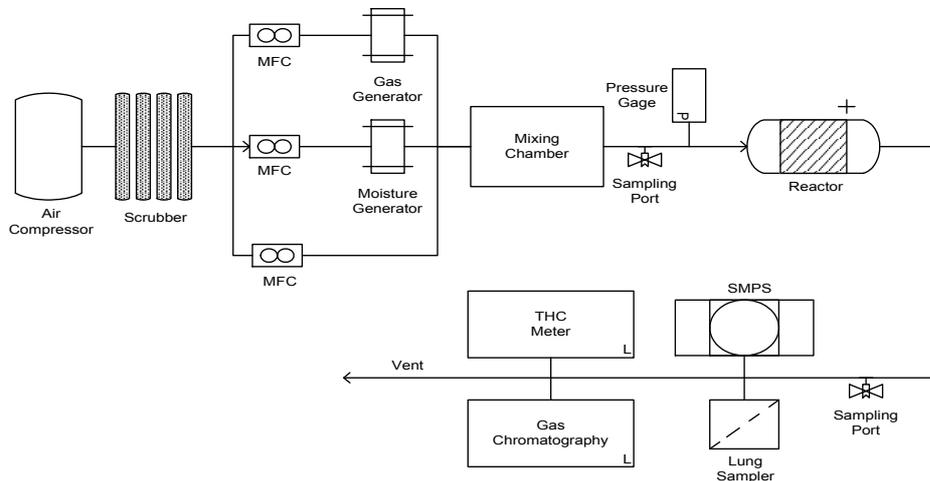
III. 연구의 내용 및 범위

□ 입자상 물질 및 악취물질 동시 배출업종 배출특성 및 현황분석

- 안산 스마트허브의 입자상 물질 및 악취물질 동시 배출업종의 특성에 대한 문헌 조사 및 현황 파악
- 영세업체 중 주 대상 업종인 아크릴 및 플라스틱 가공 및 사출업체의 배출특성 분석
- 입자상 물질 및 악취물질 동시 배출업체 현황파악
- Pilot Scale Plant 설치 대상 사업장 선정(대상 업종 및 사업장 선정)
- 현장 조사, 시료채취 및 시료분석

□ Lab Scale Plant 설계 제작 및 실험

- 입자상물질 및 악취물질 배출 모사 장치 제작
- 입자상 물질 처리공정 최적화 test (필터 형태의 종류 선정)
- 악취물질(가스상 물질) 처리용 pellet 및 honeycomb type 금속산화물 저온 촉매 제작
- 저온 촉매 반응기의 GHSV 및 최적 온도, 반응기 구조 해석
- Lab Scale Plant 실험장치 설계 및 테스트



<그림 3> Lab Scale Plant 실험장치 구성도

□ Pilot Scale Plant 최적 설계안 도출

- Lab scale plant의 운전에 따른 입자상 물질 처리장치 형태, 촉매산화장치의 최적 GHSV 및 온도 등 설계 및 운전조건 도출
- Lab scale plant의 운전 시 발견된 문제점 파악 및 설계조건 변경을 통한 최적화 테스트
- 입자상물질 처리 필터 및 가스상 처리 저온촉매 반응기의 유동 분석으로 최적 설계안 도출

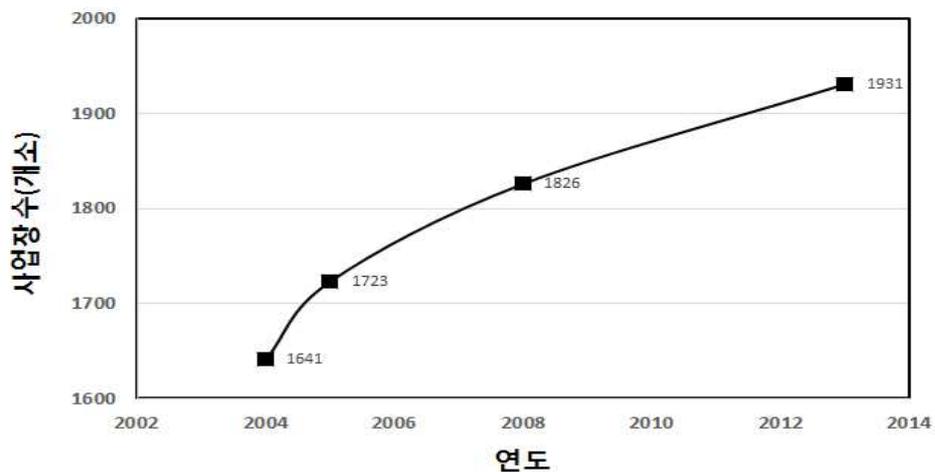
□ Pilot Scale Plant 제작 및 현장적용

- 대상 사업장 선정 및 현장 적용 pilot plant 설계 및 설치
- Pilot plant 시험운영 및 운영결과를 토대로 상용화 시설 규모 최적 설계안 도출

IV. 연구결과

□ 기초자료 조사

- 안산·시흥 스마트허브 현황조사
 - 안산·시흥 스마트허브 전체 사업장 수는 2013년 기준 1,931개소로 조사됨
 - 안산·시흥 스마트허브의 업체 수는 2013년 1,931개소가 2004년 1,641개소에 비해 약 15%정도 늘어남

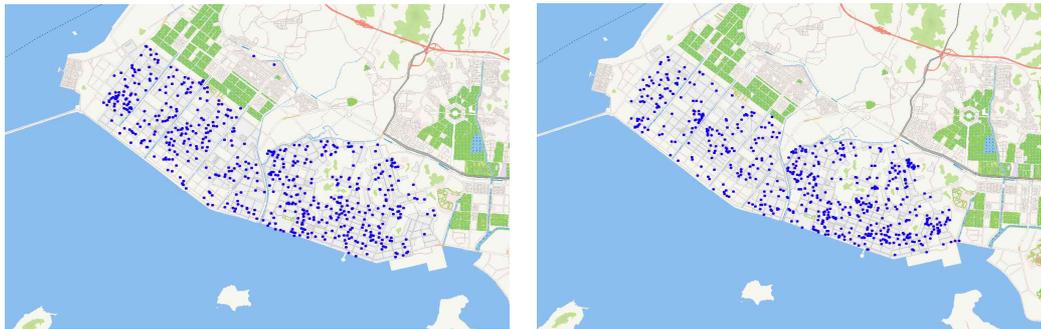


<그림 4> 안산·시흥 스마트허브 연도별 사업장 수

- 전통적인 제조업들인 섬유, 화학, 플라스틱, 금속, 기계 등의 업종들은 2004년에서 2008년까지 꾸준히 증가추세를 보이거나 2013년도의 경우는 감소하는 경향을 나타냄

○ 방지시설 설치 현황

- 안산·시흥 스마트허브의 방지시설은 거의 대부분이 스크러버와 활성탄(흡착탑)으로 악취 등 대기오염물질을 제거하고 있었음



(a) 활성탄(흡착탑) 설치 업체

(b) 스크러버 설치업체

<그림 5> 방지시설 설치업체 현황(2013년)

□ 미세먼지 및 악취 제어기술

○ 미세먼지 제어기술

- 중력집진 : 중력집진은 중력을 이용해 가스 내의 입자를 포집하는 기술로 입자의 수평속도를 감소시키는 확장실(expansion chamber)과 침강하는 입자를 포집하는 퇴적함으로 구성되어 있음
- 관성력집진 : 관성력 집진은 입자의 관성력을 이용하여 가스를 방해판에 충돌시키며 기류의 방향전환을 통해 가스 내 입자를 분리시키는 기술
- 원심력집진 : 원심력 집진장치는 가스에 선회운동을 가하여 입자가 원심력에 의해 가스로부터 분리시키는 기술
- 여과집진 : 입자를 포함한 가스를 여과재(filter)에 통과시켜서 입자를 분리·제거하는 기술
- 저온플라즈마 : 저온 플라즈마는 두 전극 사이에 고전압을 인가했을 때 코로나 방전이 이루어지며, 이때 전자가 여러 분자들에 충돌하며 분자의 이온화를 촉진시키기 때문에 에너지가 전자에 집중되어 전자온도는 높고, 이온 온도는 낮음. 전자는 분자들에 비해 질량이 매우 작으므로 저온 플라즈마를 얻는 데에는 고전력이 필요하지 않고 상온에서의 적용이 가능함.

○ 악취 제어기술

- 악취의 특성 : 악취란 황화수소, 메르캅탄류, 알데히드류, 아민류 등 자극성 있는 기체상태의 물질이 사람의 후각에 자극을 주어 불쾌감과 혐오감을 주는 냄새를 말함
- 일반적으로 악취물질을 제어하는 방법은 크게 물리화학적 처리기술과 생물학적 처리기술로 구분됨

<표 1> 일반적인 악취방지기술

구분	악취제거법		악취제거 물질
물리적 방법	수세방식		물, 활성탄 현탁액
	흡착방식		활성탄, 제올라이트
	냉각 응축방식		수냉, 공냉
	희석방식		공기, 대기확산
화학적 방법	악액흡수방식	산화흡수방식	기상산화제(오존, 염소 등) 액성산화제(차아염소산나트륨, 과산화수소수 등)
		산·알칼리흡수법	산(황산, 염산 등), 염기(NaOH, 석회 등)
	화학흡착방식		이온교환수지, 염기성가스흡착제, 산성가스흡착제
	연소방식		직접연소법, 촉매산화법, 촉열식연소법
고도산화 방법	중화제에 의한 방식		마스킹제, 중화제(식물정제유)
	오존산화 방법		활성 라디칼
	자외선(UV) 고도산화법		
	플라즈마 공정		
생물학적 방법	토양탈취		악취물질 분해 미생물
	활성오니 포기조방식		
	담체충진형		

- 물리화학적 방법 : 알칼리성 세정, 알칼리 산화성 세정, 촉매세정, 흡착법, 흡수법, 연소법, 촉매산화법 등
- 생물학적 방법 : 생물여과 방법, 살수여상 방법, 생물세정 방법, 활성슬러지 방법 등

<표 2> 생물학적 처리의 장단점

처리 방법	장점	단점
생물여과 (biofilter)	<ul style="list-style-type: none"> • 운영이 간단 • 높은 표면적 • 폐수 발생량이 적음 • 낮은 압력손실 	<ul style="list-style-type: none"> • 운전 조건 조절이 어려움 • 넓은 공간 요구 • 수분량 조절 어려움 • 유입가스 유량 변경 시 적응 기간 필요 • 세척이 어려움
살수여상 (biotrickling filter)	<ul style="list-style-type: none"> • 운전 조건 조절이 쉬움 • 세척이 쉬움 • 낮은 압력손실 • 간단한 구조 • 산소 교환율이 높음 • 이물질이 적음 	<ul style="list-style-type: none"> • clogging 발생 • 폐수의 발생 • 낮은 표면적 • 높은 운영비용
생물세정 (bioscrubber)	<ul style="list-style-type: none"> • 세척이 쉬움 • 낮은 압력손실 • 간단한 구조 • 다른 기술과 접목이 용이함 	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 운영비용 • 낮은 표면적 및 교환율 • 잉여 슬러지 발생 • 공급 산소 요구 • 이물질 세척 어려움

○ 본 연구에서의 악취제어 적용 기술

- 저온 플라즈마/촉매법 동시 적용

- 악취제거에 촉매를 이용하면 여러 반응 경로에서 원하는 물질에 대해 물질의 활성화 에너지를 낮출 수 있으므로 반응을 선택적으로 제어할 수 있음
- 촉매 산화제는 반응과정에서 스스로 소모되지 않으면서 반응속도를 변화시키는 물질로써, 반응이 진행되는 과정에 필요한 활성화 에너지를 변화시켜 반응속도를 변화시키는데 필요함

□ 저온 플라즈마 처리기술 현황

○ 저온 플라즈마

- 저온 플라즈마는 낮은 기체의 온도조건, 즉, 배기가스의 전체적인 엔탈피를 증가시키지 않는 조건에서도 유해가스를 처리할 수 있는 화학적 활성종 (chemical active species)을 발생시킬 수 있음
- 저온 플라즈마의 가장 큰 특징인 플라즈마를 구성하고 있는 입자들인 전자, 이온 및 극성이 없는 중성의 기체분자 중에서도 전자의 온도가 다른 입자들에 비해 높다는데 있음

- 저온 플라즈마는 전자, 이온, photon, 라디칼, 오존, 여기된 중성 기체분자 (excited neutral gas molecules), 온도가 높아진 중성의 기체 분자 등으로 구성됨

○ 저온 플라즈마 반응기의 종류

- 저온 플라즈마 반응기는 공급되는 전원의 종류(pulse, DC, radiofrequency, microwave)와 내부 구조에 따라 Pulse corona discharge 방식, Surface discharge 방식, Dielectric barrier discharge 방식, Plasma-driven catalyst 방식으로 나눔

<표 3> 플라즈마 반응기의 특성

반응기 종류	반응기 특징
Pulse corona discharge	<ul style="list-style-type: none"> • 전기를 짧은 펄스로 공급하여 코로나 방전을 유도 • 유전체가 없는 경우 일반적인 전기집진기 원리와 동일
Surface discharge	<ul style="list-style-type: none"> • 코로나 방전극과 유도극 사이를 0.5mm로 유지 • Ceramic 유전체를 이용하여 고에너지 방전을 일으켜 고농도의 오존 생성이 가능
Dielectric barrier discharge	<ul style="list-style-type: none"> • 유리, 석영, alumina 등의 유전체를 전극 사이에 두고 방전을 일으키는 방식
Plasma-driven catalyst	<ul style="list-style-type: none"> • 저온플라즈마 반응 효율을 높이기 위해 금속 촉매를 반응기 내부에 충전한 형태

○ 저온 플라즈마 공법의 장단점

- 장점 : 저온 플라즈마 공법은 상온 대기압 하에서 운전이 가능하며, 악취 처리 효율이 높고, 다른 기술과의 접목이 유리하여 다양한 형태의 하이브리드 기술이 가능하다는 장점이 있음
- 단점 : 저온 플라즈마 공법을 악취 제거에 도입할 경우, 플라즈마 자체만으로는 투입되는 에너지에 비해 악취물질 산화 능력이 떨어짐

□ 저온촉매 산화기술 특성

○ 금속촉매 산화기술 특성

- 촉매 소각은 연소기 내에 충전되어 있는 촉매가 연소에 필요한 활성화에너지를 낮춤으로서 비교적 저온에서 연소가 가능하도록 하는 연소방식으로 대개 직접소각의 경우 연소실의 온도를 800~900℃를 유지하여야 하나 촉매를 이용하면 이 온도를 300~400℃로 낮출 수 있음
- 통상적으로, 이러한 오염 물질 제거에는 열에 의한 소각, 흡착제를 이용한 흡착법 및 촉매접촉 산화법이 사용됨

○ 저온촉매 산화기술

- 저온촉매 산화법은 앞에서 서술한 방법들과 비교 시 낮은 온도 산화반응으로 에너지 면에서 효율적이고, 이차 오염이 없으며, 이차적인 시설이나 운반이 필요 없는 경제적인 방법임

□ Lab Scale Plant 저온촉매 제작

- Stainless Steel 316L 재질의 1/2" 튜빙을 이용하여 반응기 제작
 - 촉매반응온도를 측정하기 위하여 반응기 하부에서 Thermocouple을 장착함
 - 반응기 내부에 펠렛형 촉매를 파쇄하여 투입 후 실험진행

□ 저온촉매 VOC 제거 효율

- GHSV 6000hr⁻¹에서 온도에 따른 VOC별 제거효율을 나타낸 그래프로 톨루엔과 자일렌의 경우 60℃ 부근에서 제거효율을 보이다가 140℃에서 90%이상의 효율을 보이고 있음
- GHSV 6000에서 촉매반응기 온도를 220℃로 설정하여 톨루엔 300ppm의 제거효율을 나타낸 것으로 시간이 경과 되더라도 지속적으로 98% 이상의 높은 효율을 보임
- 촉매반응기 온도 220℃에서 GHSV 10000으로 톨루엔의 농도를 800, 1000ppm 로 증가시키면서 제거효율을 나타내었음

□ 미세먼지 현장실험 결과

- 미세먼지 중량농도는 PM₁₀ 농도가 평균 2,721μg/m³로 가장 높게 나타났으며, 일반 대기 기준보다 수십 배 높은 결과를 나타내었음
- 미세먼지 수의 분포는 가장 작은 크기인 0.3μm 가 가장 많았으며, 미세먼지의 크기가 증가할수록 그 수가 감소하는 경향을 나타냄
- PM_{2.5}의 PM₁₀에 대한 중량농도 비율은 88.5%로 일반 대기 중 비율(70-80%)보다 높게 나타나 공정 중 발생하는 미세먼지 중 PM_{2.5}의 비율을 높음을 확인할 수 있었음
- PM_{2.5}와 PM₁₀ 모두 처리 후 효율이 좋게 나타났으나 2~3일이 지나면서 1차 플라즈마 장비에서 농도가 높게 나타나 장비 내부의 세정이 필요한 것으로 파악되었음

- 플라즈마에서 제거된 후 유입되는 저온 촉매 반응기에서의 제거 효율도 높아 전체 장비의 효율은 모두 99% 이상으로 나타나 미세먼지 제거효율은 상당히 높은 것으로 나타나 미세먼지 제거에 있어 본 시설들이 성공적임을 확인할 수 있었음

<표 4> PM_{2.5} 및 PM₁₀ 제거 효율

구분	미세먼지 유입	플라즈마 처리	촉매처리	플라즈마 제거효율 (%)	촉매 제거효율 (%)	전체 효율(%)
PM ₁ (μg/m ³)	75.5	127.4	0.8	68.7	99.4	98.9
PM _{2.5} (μg/m ³)	2,409.0	215.7	1.3	91.0	99.4	99.9
PM ₁₀ (μg/m ³)	2,721.2	233.5	3.2	91.4	98.6	99.9
PM _{0.3} (#/m ³)	2,013,834.2	943,501.7	12,172.7	53.1	98.7	99.4
PM _{0.5} (#/m ³)	1,992,532.6	484,144.8	1,468.0	75.7	99.7	99.9
PM ₁ (#/m ³)	1,625,215.5	31,607.0	182.3	98.1	99.4	99.9
PM _{2.5} (#/m ³)	9,099.2	29.2	24.3	99.7	16.7	99.7
PM ₁₀ (#/m ³)	342.3	0.1	0.4	100.0	-300.0	99.9

□ THC 현장실험 결과

- 플라즈마 처리 시 제거 효율은 10% 이하로 나타나 문헌상의 15% 이하와 크게 다르지 않음을 확인할 수 있었음
- 플라즈마 제거효율과 촉매 제거효율을 합한 최종 제거 효율은 91.6%로 나타나 양호한 제거 효율을 나타내었음

<표 5> THC 제거효율

구분	THC유입	플라즈마 처리	촉매처리	플라즈마 제거효율 (%)	촉매 제거효율 (%)	전체 효율(%)
THC	329	341	28	8.7	87.7	91.6

□ 경제성 분석

- 흡착제 자체 재생식의 경우 설비비는 활성탄 흡착탑에 비해 비싸게 소요 되지만 연간 운전비가 저렴한 것으로 판단됨

<표 6> 주요 악취방지시설의 경제성 및 효율 현황

처리 방식	처리 효율	설비비	연간운전비	주요문제점	일반적인 적용기준(C6 환산농도)	
활성탄 흡착탑	85% 이상	3630만원	활성탄비 : 6800만원	• 과대한 활성탄비	• 50 ppm이하의 저농도 이 경우 활성탄 교체주기 : 약 2개월	
연소 방식	직접연소 (TO)	95% 이상	2억2830만원	LNG : 2억원 (열회수 70%기준)	• 낮은 농도시 과대한 연료비	• 2000-5000ppm 초고농도 [3000ppm인 경우 연료비 700만원]
	촉매연소 (CO)	95% 이상	2억5000만원	LNG : 6000만원 (열회수 70%기준) 촉매비 : 2000만원(교체주기 5년)	• 낮은 농도시 과대한 연료비	• 1000-2000ppm 고농도 [1500ppm인 경우 연료비 500만원]
	RTO	95% 이상	3억5000만원	LNG : 1000만원 (열회수 95%기준)	• 시설비 고가	• 10-1000 ppm의 중농도 [500ppm인 경우 연료비 200만원]
생물학적처리방식	?	약 2억원	미생물영양제 등 : 300만원 폐수처리비 : 2000만원	• 일부 VOC(특히 불용성) 낮은 효율 • 폐수 발생	• 50-300 ppm의 중농도	
저온촉매 LTCO	90% 이상	20,000만원	LNG : 1000만원 (열회수: 70%기준) 촉매비 : 2000만원(교체주기 5년)	• 촉매독이 존재할 경우 적합하지 않음	1000-2000ppm 고농도 [1500ppm인 경우 연료비 500만원]	

V. 연구결과의 활용계획

□ 기대성과

- 기존 방지시설의 유지관리 문제점을 해결하기 위해 지속적으로 방지시설을 관리할 수 있는 악취관리시스템 구축하여 악취방지시설의 효과적인 관리
- 저에너지 및 저탄소형 실용화 기반 마련하여 온실가스 감축에 기여할 수 있는 미래형 방지시설 개발기술 기반 구축
- 본 흡착제 자체 재생식 산화장치가 기존 활성탄 흡착탑의 유지관리 문제점을 해결하여 경기도의 환경문제가 빈번히 제기되고 있는 안산·시흥 스마트허브의

악취 저감에 기여

- 저비용 고효율에 방지시설을 적용하여 대부분이 영세업체인 안산·시흥 스마트 허브의 악취배출업체의 악취 및 대기오염물질 처리 애로사항 해결
- 악취저감으로 인한 지역주민의 민원 해소 및 환경개선
- 영세 및 임대 업체가 대부분인 안산·시흥 스마트허브 업체들의 환경관리 및 규제에 대한 부담 감소

□ 활용방안

- 안산·시흥 스마트허브에 밀집되어 있는 중소기업체에서 배출되는 악취 물질을 제거시키는 데 직접 활용할 수가 있고, 그 밖의 입자상 및 악취 동시 배출되는 가구 공장이 밀집되어 있는 지역이나 출판사, 인쇄소, 자동차 정비소 등의 도장 시설에서 발생하는 악취 물질을 효과적으로 제거하는 데 활용
- 본 연구에서 개발하는 입자상 및 악취 동시저감 기술은 다양한 규모로 제작할 수가 있게 하고 설치 비용과 운영 비용이 저렴하도록 하는 데 중점을 두고 있으므로 안산·시흥 스마트허브의 영세기업에서 발생하는 악취 물질을 저감시키는 데 크게 기여할 것으로 판단됨

<본문목차>

제 1장 서론	1
1. 연구의 배경 및 필요성	2
2. 연구개발 목표 및 범위	6
3. 연구개발 추진체계	12
제 2장 문헌 및 기초자료 조사	13
1. 안산·시흥 스마트허브 현황조사	14
2. 방지시설 설치업체 현황	16
3. 미세먼지 및 악취 제어 기술	17
4. 저온 플라즈마 처리기술 현황	32
5. 저온촉매 개발현황	40
제 3장 Lab Scale Plant 설계 제작 및 실험	45
1. Lab Scale Plant 저온촉매 반응기 제작	46
2. 분석기기 및 방법	48
3. 저온촉매 VOC 제거 효율	55
제 4장 Pilot Scale Plant 실험결과	58
1. 현장적용 대상업체 선정	59
2. Pilot Scale Plant 설계안	67
3. Pilot Scale Plant 현장 실험결과	69
4. 개발 기술의 경제성 분석	77
제 5장 결론 및 기대효과	81
1. 결론	82
2. 기대효과	83

<표목차>

<표 1.1> 약취 및 미세먼지 분석항목 및 분석방법	8
<표 2.1> 안산·시흥 스마트허브 업종별 현황	15
<표 2.2> 연도별 방지시설 설치업체 현황	16
<표 2.3> 미세먼지 제거기술 분류	21
<표 2.4> 플라즈마 반응기의 특징	23
<표 2.5> 주요 물질별 냄새의 특성	24
<표 2.6> 주요 화학물질의 최소감지농도	24
<표 2.7> 표준 약취처리기술	25
<표 2.8> 일반적인 약취방지기술	26
<표 2.9> 흡수 화학물질의 사용	29
<표 2.10> 생물학적 처리의 장단점	31
<표 2.11> 고온플라즈마와 저온플라즈마의 비교	33
<표 2.12> 플라즈마 반응기의 특성	37
<표 2.13> VOCs 및 약취 제거용 촉매	41
<표 2.14> Honeycomb형 백금촉매 사용시 연소 온도	42
<표 3.1> THC meter 분석 조건	48
<표 3.2> GC/FID 분석 조건	49
<표 3.3> 미세먼지 측정기(InnoAir-615) 장비 사양	53
<표 3.4> 미세먼지 측정기(LYS-125) 장비 사양	54
<표 4.1> 현장적용 업체 선정	61
<표 4.2> 기존 방지시설에 대한 대상업체의 문제점	63
<표 4.3> 원료 사용물질의 종류 및 사용량	65
<표 4.4> 원료 사용물질의 혼합 후 용제 조성	66
<표 4.5> S 도장 업체에 설치된 흡착 plant의 설계 기준	69
<표 4.6> 시료분석 항목 분석 방법	72
<표 4.7> 유입 미세먼지 농도	73
<표 4.8> PM2.5 및 PM10 농도 비율(%)	74
<표 4.9> PM2.5 및 PM10 제거 효율	76
<표 4.10> 중량법 측정에 의한 PM10 제거 효율	76
<표 4.11> THC 제거효율	77
<표 4.12> 약취(공기회석배수) 제거효율	78
<표 4.13> 주요 약취방지시설의 경제성 및 효율 현황	80
<표 4.14> 비용 및 경제성 평가 결과	81
<표 4.15> 저온플라즈마 & 저온촉매 적용 가능한 업체 현황	82

<그림목차>

<그림 1.1> 안산시흥 스마트허브 업체현황(1,931개, 2013년 기준)	2
<그림 1.2> 안산시 약취 발생건수 추이	3
<그림 1.3> 약취 방지시설	4
<그림 1.4> 플라스틱 사출 공정도	4
<그림 1.5> 연구개발 세부내용	6
<그림 1.6> 안산·시흥 스마트허브 업종별 업체현황	7
<그림 1.7> 시료측정 및 분석장비	8
<그림 1.8> 시료분석 관련 사진	9
<그림 1.9> 약취제거 효율측정 기기(THC meter(F.I.D. Model-10))	10
<그림 1.10> Lab Scale Plant 구성 및 실험조건	10
<그림 1.11> 연구개발 추진 체계	12
<그림 2.1> 안산·시흥 스마트 허브 전체 사업장 현황	14
<그림 2.2> 안산·시흥 스마트허브 연도별 사업장 수	14
<그림 2.3> 방지시설 설치업체 현황(2013년)	16
<그림 2.4> 중력집진시설	17
<그림 2.5> 관성력 집진 원리	18
<그림 2.6> Cyclone형 원심력 집진장치의 종류	19
<그림 2.7> (a)확산, (b)관성충돌, (c)차단에 의한 입자의 움직임	20
<그림 2.8> 저온 플라즈마의 기본 과정	35
<그림 2.9> 일반적인 저온플라즈마 반응기	39
<그림 2.10> 촉매의 기능	40
<그림 2.11> 허니콤 촉매반응 모식(도)	44
<그림 3.1> Lab Scale Plant 촉매반응기 모식도	46
<그림 3.2> Lab Scale Plant 실험장치 구성도	47
<그림 3.3> 벤젠의 검량선	50
<그림 3.4> 자일렌의 검량선	50
<그림 3.5> 톨루엔의 검량선	51
<그림 3.6> 대기오염공정시험기준에 따른 미세먼지 측정	52
<그림 3.7> 미세먼지 측정기기 사진	55
<그림 3.8> BTX 제거효율(GHSV=6.000hr ⁻¹)	57
<그림 3.9> 톨루엔 제거효율(200℃, GHSV=6.000hr ⁻¹)	58
<그림 3.10> 톨루엔 제거효율(200℃, GHSV=6.000hr ⁻¹ ~ 10,000hr ⁻¹)	58
<그림 3.11> 톨루엔 제거효율(200℃, GHSV=10,000hr ⁻¹)	59

<그림목차>

<그림 4.1> 대상업체 제품생산 공정도 및 주요 약취 배출원	62
<그림 4.2> 건조공정의 주요 약취 원인 물질	62
<그림 4.3> 대상업체 건조공정 시간별 약취 배출 특성	63
<그림 4.4> Pilot plant 설계 도면	70
<그림 4.5> Pilot Plant 제작 및 설치	71
<그림 4.6> 시료채취 장비	72
<그림 4.7> 유입 및 1,2차 처리 후 미세먼지 농도 추이	75
<그림 4.8> 유입 및 1,2차 처리 후 THC 분포	77
<그림 4.9> 시료채취 현장 사진	79
<그림 4.10> 개발기술 적용 가능업체 위치(안산·시흥 스마트허브)	83

제 1장 서론

-
1. 연구의 배경 및 필요성
 2. 연구개발 목표 및 범위
 3. 연구개발 추진체계
-

제 1장 서론

1. 연구의 배경 및 필요성

1.1. 연구의 배경

1.1.1. 안산지역 스마트허브 영세업체 현황

- 약취 배출업체의 소규모화 및 영세화로 15인 미만 사업장 증가(전체 75% 이상)
- 미세먼지 및 악취물질 동시 배출사업장의 동시 처리방법의 한계
 - 흡수, 흡착에 의한 시설이 85% 이상으로 유지관리에 한계가 있음



<그림 1.1> 안산시흥 스마트허브 업체현황(1,931개, 2013년 기준)

1.1.2. 안산시 악취민원 현황

- 안산시 악취민원 감소 추세
 - 2008년 이후부터 유사한 악취민원 발생건수 유지
- 원인 불명의 악취 발생건수가 대부분 차지
 - 악취는 기상조건에 따라 인근 지역에 미치는 영향이 다를 수 있음
 - 또한, 악취는 원인이 다양하고 복합적이며, 미량만 있어도 피해를 주는 등 해결이 어려움



<그림 1.2> 안산시 악취 발생건수 추이

1.2. 연구의 필요성

1.2.1. 다양한 악취 물질의 배출

- 안산·시흥지역에 위치한 반월·시화공단은 다양한 악취물질 배출
 - 이러한 악취 배출원 중 입자상 및 악취물질 동시 배출되는 사업장 많음
 - 이들 업종으로 인해 안산지역의 악취 민원 증가
- 이러한 입자상 및 악취 동시 배출업종의 경우, 특히 반월·시화공단 영세업체는 대부분 활성탄 흡착탑을 설치·운영
 - 입자상 물질의 영향으로 인해 활성탄 흡착 및 포집성능이 저하
 - 작업장의 환경 문제 및 악취발생 민원의 증가로 이어짐
- 그러나 입자상과 악취물질을 동시에 배출하는 배출시설에 적합한 방지시설의 경우 습식전기집진기 및 축열식 연소산화장치(RTO)등 고가의 방지기술 적용
 - 반월·시화공단의 영세업체에 적용하기 어려운 현실
 - 따라서, 이를 해결하기 위한 저비용의 적정기술 개발 필요

1.2.2. 영세업체 악취물질 처리의 문제점

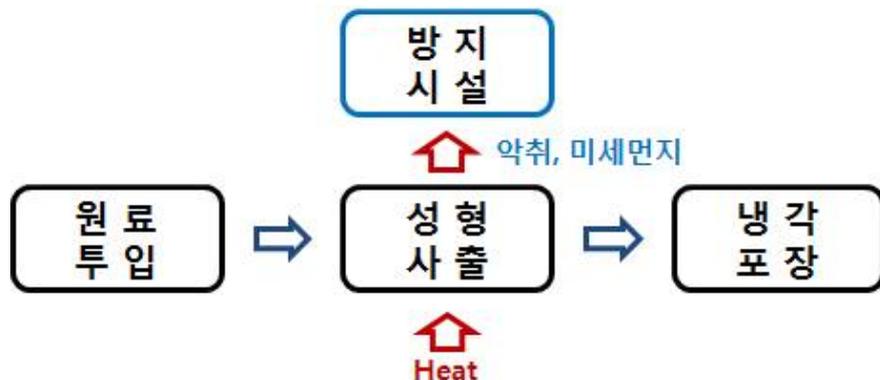
- 플라스틱, 아크릴 사출업체 특성
 - 성형 및 사출공정 시 열적 성형에 따른 악취물질(VOCs 포함) 및 미세먼지 동시 발생

- 용융온도가 높을수록 페플라스틱이 고온에 노출되며, 이로 인하여 폴리머 원료와 각종 첨가제의 분해가 촉진되어 각종 탄화수소를 포함하여 알데이드 등과 같은 유기산화물이 발생됨



<그림 1.3> 악취 방지시설

- 가스상 악취물질, 입자상물질 동시 처리의 어려움
 - 악취 배출시설에 다수 적용중인 활성탄 흡착탑은 미세먼지 등으로 인하여 활성탄 헐착 및 포집성능 저하
 - 활성탄 교체주기가 짧아져 운용비 증가 및 운영관리의 어려움 야기
 - 활성탄 등 악취물질을 제거하기 전 미세먼지를 제거하는 공정이 필수적으로 필요할 것으로 판단됨



<그림 1.4> 플라스틱 사출 공정도

1.2.3. 연구개발 필요성

- 대부분의 사업장이 도심부와 떨어진 장소에 위치해 있음에도 불구하고 악취 방지시설의 처리효율이 매우 낮아 고농도 악취가 장거리 확산되어 악취관련 민원을 일으키고 있는 실정임
 - 국내의 폐플라스틱 재활용 시설에서 발생하는 악취물질의 배출특성으로 미루어보아 악취 억제를 위한 관리가 매우 미흡한 실정
- 입자상 물질 및 악취물질을 효율적으로 동시처리가 가능한 기술개발 필요
 - 기존 기술(전기집진장치, RTO등)은 설치비, 운영비가 고가이기 때문에 영세업체에 적용하는데 한계가 있음
 - 영세업체에 적용 가능한 저비용, 고효율의 방지시설 개발이 필요
- 본 연구는 기존 활성탄 흡착탑의 문제점을 해결하면서 에너지 사용량이 적고, 미세먼지와 악취물질을 동시에 처리되는 경제적으로 효율적인 기술을 개발하고자 함

2. 연구개발 목표 및 범위

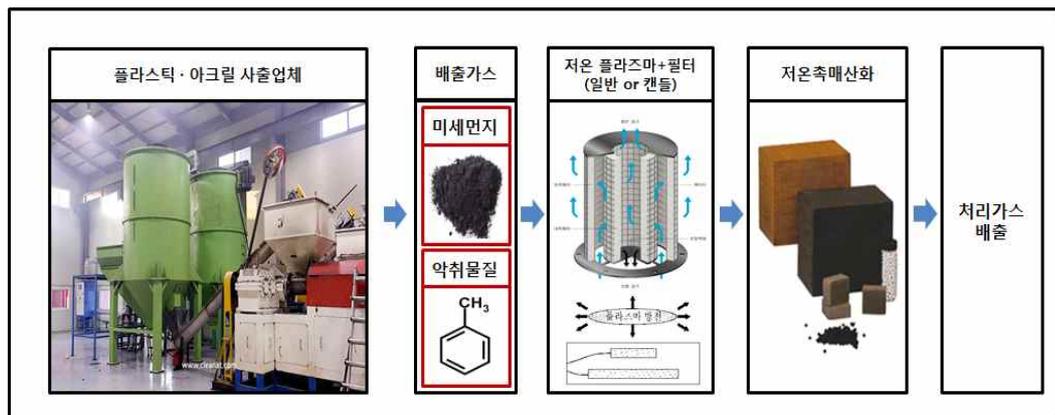
2.1. 연구개발 목표

2.1.1. 연구개발 최종목표

- 저온촉매와 입자 제거기술 융합형 악취 및 미세먼지 동시 처리기술 개발
 - 설비의 유지관리가 용이하고 미세먼지 및 악취물질을 저에너지 및 저탄소로 처리가 가능한 방지기술을 개발하고, 소규모 pilot plant를 설치·운영을 통해 실증규모의 기술 확보

2.1.2. 연구개발 세부목표

- 설비의 유지관리가 용이하고 운전비가 저렴한 처리기술 개발
- 대기환경보전법 및 악취방지법 기준을 만족하는 수준까지 배출가스 처리
- 입자상 물질, 악취물질의 동시처리가 가능한 저비용 고효율의 상용화 설비 설계(안) 도출



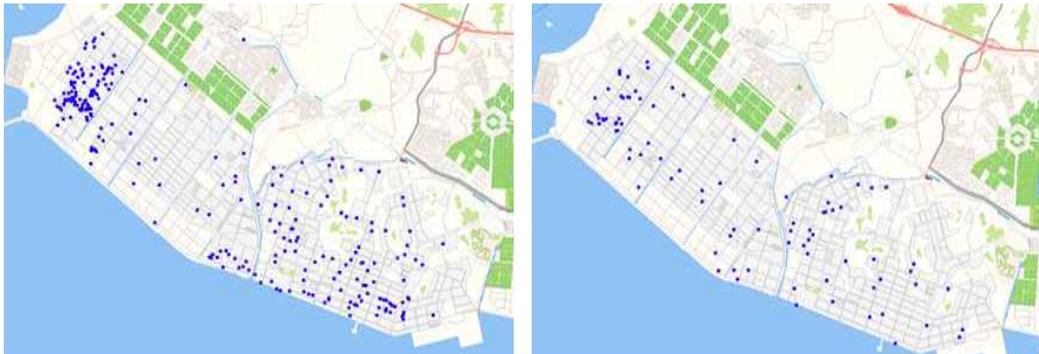
<그림 1.5> 연구개발 세부내용

2.2. 연구개발 범위

2.2.1. 입자상 물질 및 악취물질 동시 배출업종 배출특성 및 현황 분석

- 안산 스마트허브의 입자상 물질 및 악취물질 동시 배출업종의 특성에 대한 문헌조사 및 현황 파악

- 관련연구 및 특허, 공단 내 업종분포 현황, 안산 내 대기오염물질 및 악취 물질 배출현황 등에 대한 자료수집 및 문헌조사 실시
- 영세업체 중 주 대상 업종인 아크릴 및 플라스틱 가공 및 사출업체의 배출 특성 분석
 - 아크릴 및 플라스틱 제조공정에 대한 현장방문을 통한 현황파악
 - 개발 기술 적용에 적합한 사업장 선정 및 시료채취 및 분석 실시 (입자상 물질, THC 분석, 물성 분석)
- 입자상 물질 및 악취물질 동시 배출업체 현황파악
 - 안산·시흥 스마트허브 악취 배출업체 현황 data base 자료 파악
 - 안산·시흥 스마트허브 악취 대기배출업체 전수조사
 - 화학물질정보(MSDS)자료 활용
 - 악취 및 대기오염물질 관련 연구보고서 확인
 - 화학물질 배출량 조사(TRI), 화학물질 배출 이동량 정보(PRTR) 및 장외영향 평가 관련자료 조사



화학물질 및 화학제품 제조업(245업체)

플라스틱제품 제조업(88개 업체)

<그림 1.6> 안산·시흥 스마트허브 업종별 업체현황

- Pilot Scale Plant 설치 대상 사업장 선정(대상 업종 및 사업장 선정)
- 현장 조사 및 시료채취
 - 문헌조사 수집자료 검토를 통해 업종 및 대상 사업장 선정
 - 중요 고려사항 : 영세사업장 여부, 입자상 물질 및 악취물질 배출농도, 배출 가스 유량, 온도 등



배출가스 채취장치



Lung sampler 시료채취



THC meter (TVA-1000B)



미세먼지 측정기 (MDL-125)



미세먼지 측정기 (LDU-100)

<그림 1.7> 시료측정 및 분석장비

<표 1.1> 약취 및 미세먼지 분석항목 및 분석방법

분석항목	분석방법	채취지점 (지점)	시료채취 횟수	시료 수 (개)	비고
THC	-	2	1	2	실시간 분석
복합약취	약취공정 시험기준	2	1	2	
약취물질 성분분석	GC/MS	2	1	2	
미세먼지	대기오염공정 시험기준	2	1	2	

○ 시료분석

- 분석항목 : THC, 약취물질 성분분석, 복합약취, 미세먼지 함량 및 입경분포
- Data 활용
 - 입자상 물질 및 약취물질 배출농도 파악
 - 배출가스 모사장치 개발의 기초자료 활용
 - Lab Scale Plant 설비 및 설계 기초자료로 활용



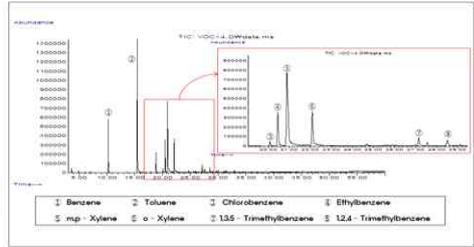
[공기희석관능법 분석 절차]



[기체크로마토그래피 분석장비 (GC/MS)]



[THC methar (FID model-10)]



[대상업종의 주요 악취 물질 분석(예)]

<그림 1.8> 시료분석 관련 사진

2.2.2. Lab Scale Plant 설계 제작 및 실험

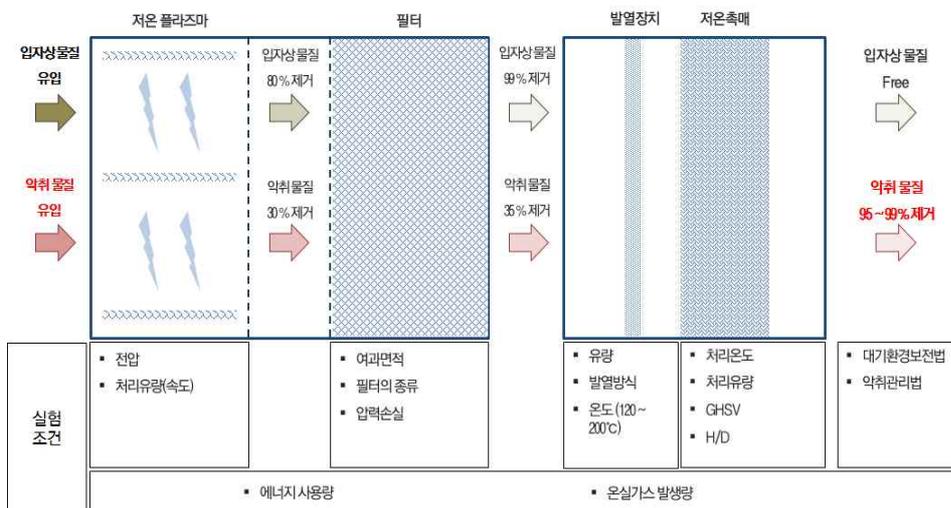
- 입자상물질 및 악취물질 배출 모사 장치 제작
 - 대상 사업장에서 채취한 시료의 분석결과를 바탕으로 해당물질이 일정한 농도, 일정 유속으로 흐를 수 있는 배출 모사 장치 제작
- 입자상 물질 처리공정 최적화 test (필터 형태의 종류 선정)
 - 대상 사업장의 경우 입자상 물질의 특성 및 입경 분포 특성을 고려하여 설계
 - 1차 입자 처리기술(저온플라즈마) 및 2차 입자 처리기술(필터 타입)을 적용하여 배출 모사 장치와 연결하고 시험운전을 통해 입자의 크기 (입경)분포에 따른 저온플라즈마 운전조건 및 필터의 내경, 외경, 밀도, 필터의 두께 등의 최적 설계 조건 파악
- 악취물질(가스상 물질) 처리용 pellet 및 honeycomb type 금속산화물 저온 촉매 제작
 - 악취 원인물질에 따른 촉매 제작 조건 설정과 촉매형태에 따른 압력손실, 제작 및 설치비용, 처리 효율 등을 고려하여 최적 망간산화물 저온촉매 유형 결정
 - 망간산화물 및 기타 성분 최적 혼합 레시피 및 제작 조건 파악

- 저온 촉매 반응기의 GHSV 및 최적 온도, 반응기 구조 해석
 - 촉매의 효율 평가를 위해 최적 기체공간속도 (gas hourly space velocity, GHSV) 파악
 - 저온촉매 반응기의 약취물질별 최적 운전조건(온도, GHSV, H/D비 등) 및 구조 해석



<그림 1.9> 약취제거 효율측정 기기(THC meter(F.I.D. Model-10))

- Lab Scale Plant 실험장치 설계 및 테스트
 - 배출가스 모사장치 설계 및 제작(대상 약취 및 입자상 물질 유입조건 설정)
 - 입자상 물질 처리장치 용량, 필터, 저온 플라즈마 발생장치 종류 결정 및 내부 구조 설계
 - 약취물질(가스상물질) 처리용 촉매 형태(펠릿, 허니콤형), 가열방식 결정
 - Lab Scale Plant 실험장치 테스트 결과 및 보완사항 도출



<그림 1.10> Lab Scale Plant 구성 및 실험조건

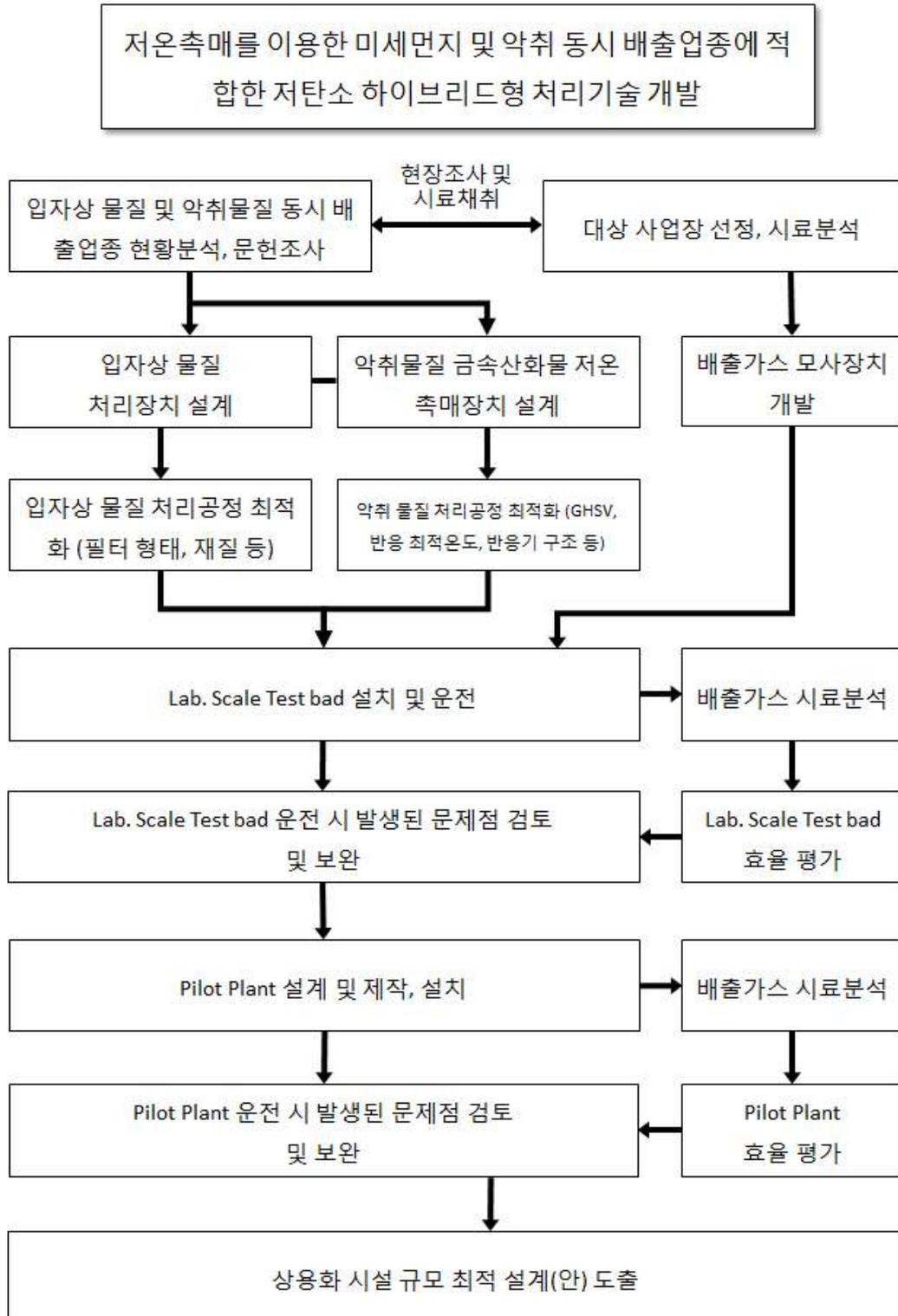
2.2.3. Pilot Scale Plant 최적 설계안 도출

- Lab scale plant의 운전에 따른 입자상 물질 처리장치 형태, 촉매산화장치의 최적 GHSV 및 온도 등 설계 및 운전조건 도출
 - 설비의 독립운전 및 병합, 처리물질의 농도 조건 등에 따른 설비 운전조건 도출
 - Pilot scale plant 설계를 위한 최적 설계자료 도출
- Lab scale plant의 운전 시 발견된 문제점 파악 및 설계조건 변경을 통한 최적화 테스트
 - 독립 설비의 병합 및 병합운전을 통해 발생된 문제점 파악
 - 문제점 검토 및 해결방안 도출 및 설비 적용 테스트
- 입자상물질 처리 필터 및 가스상 처리 저온촉매 반응기의 유동 분석으로 최적 설계안 도출
 - 입자상 물질 및 액체물질의 농도, 유량, 온도 등에 따른 필터 및 반응기내 처리속도, 효율, 처리가스의 흐름 등을 분석하여 최적 설계안 도출

2.2.4. Pilot Scale Plant 제작 및 현장적용

- 대상 사업장 선정 및 현장 적용 pilot plant 설계 및 설치
 - 현황분석을 통해 적용 가능한 대상 사업장 선정
 - 대상 사업장 적용 1m³/min 규모 pilot scale plant 설계 및 설치
- Pilot plant 시험운영 및 운영결과를 토대로 상용화 시설 규모 최적 설계안 도출
 - Pilot Plant 시험운영 및 처리효율 평가
 - 설비운영 시 문제점 및 보완사항 도출 및 개선방안 마련
 - 개선방안을 적용한 최적 설계안 도출

3. 연구개발 추진체계



<그림 1.11> 연구개발 추진 체계

제 2장 문헌 및 기초자료 조사

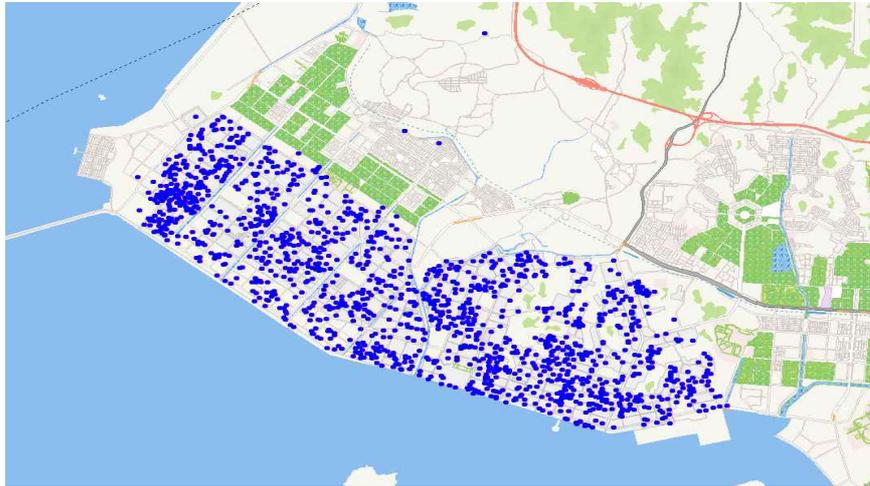
-
1. 안산·시흥 스마트허브 현황조사
 2. 방지시설 설치업체 현황
 3. 미세먼지 및 악취 제어 기술
 4. 저온 플라즈마 처리기술 현황
 5. 저온촉매 개발현황
-

제 2장 문헌 및 기초자료 조사

1. 안산·시흥 스마트허브 현황조사

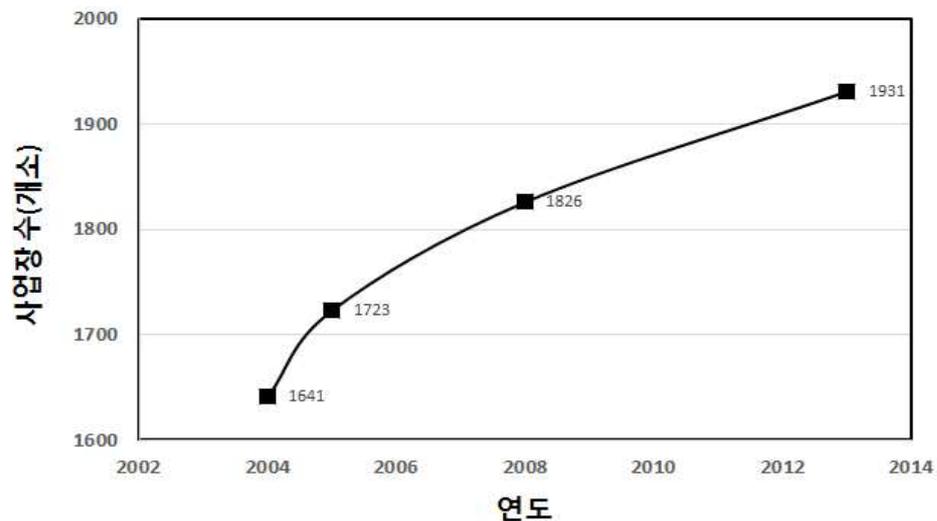
1.1. 안산·시흥 스마트허브 전체 사업장 현황

- 안산·시흥 스마트허브 전체 사업장 수는 2013년 기준 1,931개소로 조사됨



<그림 2.1> 안산·시흥 스마트 허브 전체 사업장 현황

- 안산·시흥 스마트허브의 업체 수는 2013년 1,931개소가 2004년 1,641개소에 비해 약 15%정도 늘어남



<그림 2.2> 안산·시흥 스마트허브 연도별 사업장 수

1.2. 안산·시흥 스마트허브 업종별 현황

- 전통적인 제조업들인 섬유, 화학, 플라스틱, 금속, 기계 등의 업종들은 2004년에서 2008년까지 꾸준히 증가추세를 보이거나 2013년도의 경우는 감소하는 경향을 나타냄
- 2004년에 비해 2013년에 산업분류코드가 늘어나는 등 업종을 세분화하여 분류하여 기타에 포함되는 업종이 늘어나는 것으로 파악됨

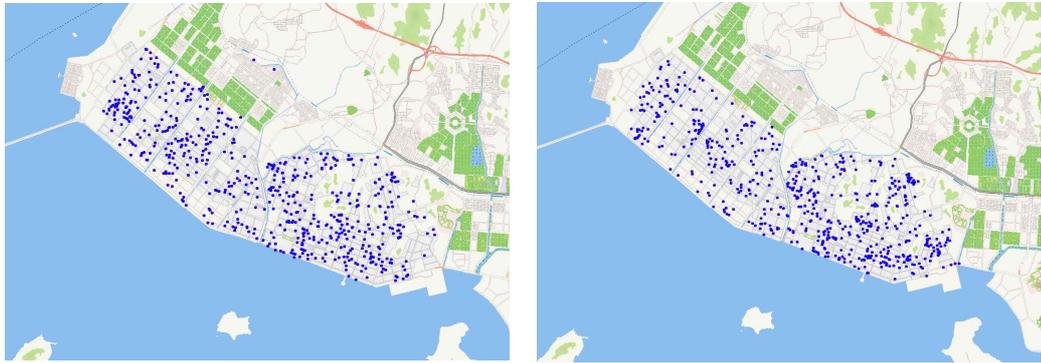
<표 2.1> 안산·시흥 스마트허브 업종별 현황

업종	2004	2005	2008	2013
합계	1,641	1,723	1,826	1,931
섬유제품, 봉제의복 등	103	90	129	116
화합물 및 화학제품 제조업	282	304	301	245
고무 및 플라스틱 제조업	71	86	85	88
조립금속제품 제조업	501	519	533	503
1차 금속 제조업	126	128	133	104
기타 기계 및 장비 제조업	81	102	93	90
기타	477	494	552	785

2. 방지시설 설치 업체 현황

2.1. 연도별 방지시설 설치업체 현황

- 안산·시흥 스마트허브의 방지시설은 거의 대부분이 스크러버와 활성탄(흡착탑)으로 악취 등 대기오염물질을 제거하고 있었음
 - 스크러버와 활성탄을 동시에 설치하고 있는 업체가 많았음
 - RTO, CTO 및 바이오 필터의 설치는 최근에 많이 이루어지고 있었음



(a) 활성탄(흡착탑) 설치 업체

(b) 스크러버 설치업체

<그림 2.3> 방지시설 설치업체 현황(2013년)

<표 2.2> 연도별 방지시설 설치업체 현황

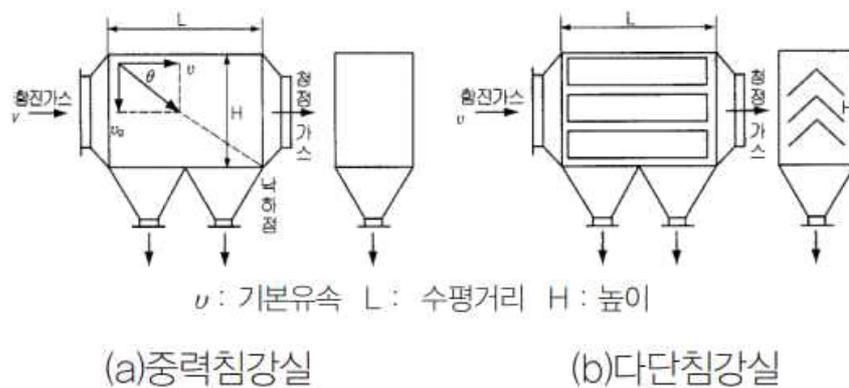
방지시설 종류	2004	2005	2008	2013
합계	1,293	1,409	1,939	1,677
스크러버	824	853	796	710
활성탄(흡착탑)	456	556	614	607
RTO, CTO, RCO	13	-	36	32
바이오필터	-	-	34	31
탈취	-	-	118	86
방지시설 기타	-	-	341	236

3. 미세먼지 및 악취 제어 기술

3.1. 미세먼지 제어 기술

3.1.1. 중력 집진

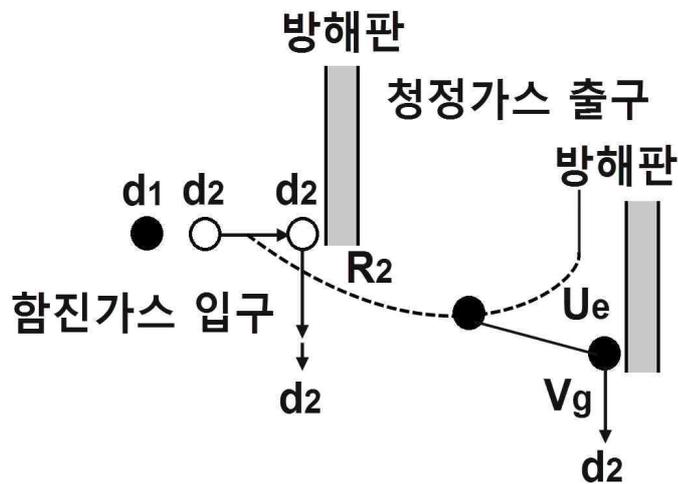
- 중력집진은 중력을 이용해 가스 내의 입자를 포집하는 기술로 입자의 수평 속도를 감소시키는 확장실(expansion chamber)과 침강하는 입자를 포집하는 퇴적함으로 구성되어 있음
 - 별도의 기계적 제어 없이 자연적으로 입자의 분리가 이루어지며 가스를 수평으로 배출했을 때 가장 이상적인 입자의 중력 침강현상을 보임
 - 중력침강으로 미세입자를 제거하기 위해서는 확장실의 크기가 너무 커지므로 주로 산업시설에서는 거대입자의 제거에 이용됨
- 중력집진 시설은 아래 그림과 같이 중력 침강실, 다단 침강실과 같은 형식이 있음
 - 중력 침강실은 굵은 먼지입자를 포집하는데 사용
 - 다단 침강실은 장치 내부에 다수의 침전판을 설치하여 침강 높이를 낮춰 집진효율을 높임
 - 중력 집진의 효율은 처리가스의 속도가 느릴수록, 침강실 내 배기 기류가 균일할수록, 침강실의 높이가 낮고 길이가 길수록 높아짐



<그림 2.4> 중력집진시설

3.1.2. 관성력 집진

- 관성력 집진은 입자의 관성력을 이용하여 가스를 방해판에 충돌시키며 기류의 방향전환을 통해 가스 내 입자를 분리시키는 기술
- 방해판에 충돌된 가스 내의 입자는 침강력에 의해 분리·제거되는데, 충돌되지 않고 기류 속에 남아있던 입자는 다음 방해판에 의해 기류 방향이 전환되어 침강되어 분리되는 과정이 계속됨

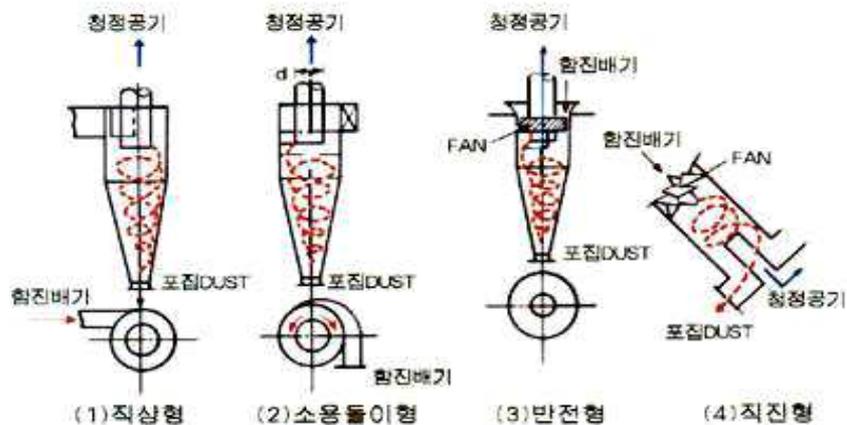


<그림 2.5> 관성력 집진 원리

- 관성력 집진은 10 μm 이상의 큰 입자의 포집에 사용되는 것이 일반적이며, 고온 가스처리가 가능하여 굴뚝 또는 배관에 적용
- 관성력 집진에서는 가스의 흐름속도와 방향전환 각도 등이 중요하게 작용
- 방해판 충돌 전 가스의 배기속도는 입자의 성상에 따라 약간 빠른 속도를 유지해야하며 충돌 후 처리가스의 출구 유속은 느릴수록 미세입자의 제거 효율이 높아짐
- 또한 가스가 방해판에 충돌한 이후 방향전환 각도가 작고 그 횟수가 많을수록 압력손실은 늘어나지만 집진효율은 좋아짐

3.1.3. 원심력(Cyclone) 집진

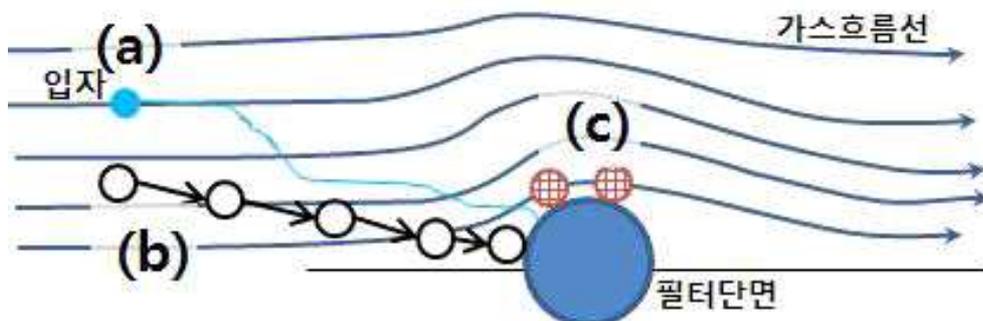
- 원심력 집진장치는 가스에 선회운동을 가하여 입자가 원심력에 의해 가스로부터 분리시키는 기술
 - 원심력 집진기 내부로 유입된 기체는 원통 내부를 나선형으로 회전하면서 내부 벽면 측에서 먼지입자와 분리됨
 - 분리된 먼지입자는 벽면을 타고 아래로 흘러 분진 저장조에 저장
 - 원추형 원통 중앙은 음압으로 유지되기 때문에 먼지입자가 빠져나간 기체는 장치 상부로 빠져나감
- 원심력 집진기는 cyclone 형식과 회전식이 있는데 주로 cyclone 형식이 널리 사용
 - 처리가스의 도입방법에 따라 직상형과 소용돌이형을 접선유입식 cyclone이라 분류하고 반전형과 직진형을 축류식 cyclone으로 구분
 - 접선유입식은 먼지입자가 함유된 기체를 외통에 접선 유입시키는 것으로, 이때 일반적인 가스 유입 속도는 7~15 m/sec이며 이 범위에서는 집진율의 변화는 비교적 적음
 - 축류식은 분진입자가 함유된 기체를 축방향에서 유입하는 것으로 직진형보다는 반전형이 많이 쓰임
 - 반전형의 가스 유입 속도는 10 m/sec 전후이며 직진 유입식에 비해 약 3배의 가스량을 처리할 수 있으며, 집진효율은 접선유입식과 비슷함



<그림 2.6> Cyclone형 원심력 집진장치의 종류

3.1.4. 여과 집진

- 입자를 포함한 가스를 여과재(filter)에 통과시켜서 입자를 분리·제거하는 기술
 - 이 때 사용하는 여과재가 자루 형태이기 때문에 여과 집진시설을 백 필터(bag filter)라고 칭하기도 함
 - 여과 집진 기술에서는 관성충돌, 차단, 확산작용이 주요 포집기전이 되며, 입경이 $0.1 \mu\text{m}$ 정도의 미세한 입자는 확산 작용에 의해 주로 포집되는 반면 굵은 입자는 관성충돌, 차단 작용으로 인해 주로 제거
- 확산 작용이란 크기가 작은 미세입자가 유선에 따라 움직이지 않고 확산되며 부착되는 현상을 말하는 것임
 - 입자 크기가 작을수록 확산에 의한 입자 부착이 많아져 여과가 증가
 - 이 때 입자에 작용하는 힘은 반데르발스 힘(van der Waal's force)
- 관성 충돌이란 입자의 크기가 크거나 유선의 곡률이 심할 때 입자가 유선에서 벗어나 여과재 표면에 충돌하여 부착되는 현상을 말함
 - Stokes 수는 관성충돌의 메커니즘을 나타내는 수로 Stokes 수가 클수록 관성에 의한 포집이 증가하고, 공기의 속도가 증가하거나 입자의 크기가 클 때 또한 충돌 효과는 상승함
 - 차단은 입자 크기가 여과재 공극보다 클 때 일어나는 현상으로 유속과는 관계없이 포집되며, 그렇기 때문에 입경이 큰 입자들은 확산이나 관성충돌 없이 포집이 가능



<그림 2.7> (a)확산, (b)관성충돌, (c)차단에 의한 입자의 움직임

<표 2.3> 미세먼지 제거기술 분류

집진장치 종류	집진원리	원리	장점	단점
중력집진	중력	중력에 의한 자연 침강을 이용하여 먼지를 분리·포집하는 장치	<ul style="list-style-type: none"> • 압력손실이 적음 • 설계 및 유지 보수가 간단 • 큰 입자를 취급하며 온도에 무관 • 설치비와 조작비가 저렴 	<ul style="list-style-type: none"> • 설치 면적이 큼 • 집진 효율이 낮음 • 먼지 부하 및 유량 변동에 민감
원심력집진	원심력	먼지가 포함된 가스를 선회 운동시켜 입자에 대해 원심력을 이용하여 분리·포집하는 장치	<ul style="list-style-type: none"> • 구조가 간단하여 취급이 용이 • 설치면적이 작음 • 온도의 영향이 작음 • 먼지의 연속 배출이 가능 • 부하가 높은 점착성, 마모성, 부식성 가스에 적합 	<ul style="list-style-type: none"> • 압력 손실이 큼 • 입구가스실이 많이 필요 • 입경이 작은 먼지는 집진효율이 낮음
여과집진	충돌, 확산, 차단	먼지가 포함된 가스를 여포에 통과시켜 입자의 관성충돌, 확산, 차단 등에 의해 먼지를 분리·포집하는 장치	<ul style="list-style-type: none"> • 운전성능 확인이 쉬워 조작 불량률의 조기발견 가능 • 작은 입경의 먼지집진 효율 좋음 • 시설비와 유지비가 저렴함 • 다양한 형태의 분진 포집가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 여과 속도에 민감 • 폭발성, 점착성, 가연성 분진 처리 어려움 • 압력손실이 큼 • 운전비가 많이 듦 • 함수율 높은 가스, 고온 가스에는 부적합
세정집진	관성력, 차단	먼지가 포함된 가스에 물을 분사시켜 액막, 기포 등을 다량으로 형성하고, 분진의 확산, 충돌, 응집, 부착에 의해 분리·포집하는 장치	<ul style="list-style-type: none"> • 가스의 제거 및 집진이 동시에 가능 • 고온 가스에 대한 냉각효과 • 고온, 연소성, 폭발성, 유독성의 가스 제거 가능 • 작은 설치 면적 	<ul style="list-style-type: none"> • 배출수의 처리 문제 • 운전비용이 많이 듦 • 압력 손실에 의한 소요 동력 증가 • 부식 및 침식 문제 • 친수성이 없는 분진제거에는 적당하지 않음
전기집진	정전기력	코로나 방전을 이용하여 가스에 포함된 입자에 전하를 가하여 이온화 시킨 후 집진극에 분리·포집하는 장치	<ul style="list-style-type: none"> • 집진장치 중 처리효율이 가장 우수 • 운전 및 보수비용이 적어 대용량 고성능 집진장치로 사용 • 압력손실이 적어 송풍기에 의한 동력비 절감 • 고온 및 폭발성 가스 처리가능 • 0.1 μm 이하의 미립자 집진이 가능 • 습식, 건식으로 집진가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 초기 시설비가 많이 듦 • 먼지 부하 및 가스의 유량에 민감 • 고전압에 대한 안정 필요 • 먼지에 따라 전처리 시설 필요

3.1.5. 플라즈마 집진

○ 플라즈마의 원리

- 플라즈마는 일정 공간의 기체 내에 양전하를 띤 이온과 음전하를 띤 전자가 같은 밀도로 존재하여 전체적 공간이 전기적 중성을 유지하고 있는 상태
- 기체 내에 고압 방전을 하면 그 안에 있던 전자와 이온, 중성입자끼리의 충돌로 인해 운동에너지가 커지며 에너지의 교환이 활발해짐
- 이 때 온도도 높게 상승하게 되는데 전자와 이온, 중성입자의 온도가 고온으로 거의 같은 상태를 열적 평형 상태, 열 플라즈마(Thermal plasma)라고 하고, 열평형에 도달하기 전 낮은 압력 때문에 열적으로 평형을 이루지 못한 상태를 저온 플라즈마(Non-thermal plasma, NTP)라 함

○ 저온 플라즈마

- 저온 플라즈마는 두 전극 사이에 고전압을 인가했을 때 코로나 방전이 이루어짐
- 이때 전자가 여러 분자들에 충돌하며 분자의 이온화를 촉진시키기 때문에 에너지가 전자에 집중되어 전자온도는 높고, 이온 온도는 낮음
- 전자는 분자들에 비해 질량이 매우 작으므로 저온 플라즈마를 얻는 데에는 고전력이 필요하지 않고 상온에서의 적용이 가능함. 이러한 저온 플라즈마 반응의 일상적인 예로 형광등을 들 수 있음
- 상온에서 저온 플라즈마는 전자, 이온, 라디칼, 오존 등으로 구성되어 있으며 이들 물질로 다양한 화학 반응을 일으킴
- 특정 대상에 대한 선택성 없이 일괄적으로 분자상 물질을 분해하고, 이온화시키기 때문에 가스 내 유해 오염물질의 무해화나 입자상 물질의 저감 등 다방면의 산업기술에 접목하여 이용할 수 있음

○ 코로나 방전

- 기체에 고전압을 인가하면 양쪽 전극의 전위차로 인해 전류가 흐르기 시작하는데 이때를 코로나 개시상태(Onset of Corona)라고 함. 이후 전류와 전압이 지속적으로 상승하여 고 에너지 전자 및 radical이 짧은 시간동안 존재하는 플라즈마 상태를 코로나 방전이라 칭하고 있음
- 코로나 방전에 의한 오염물질의 분해 및 이온화는 활성화된 전자에 의한 직접산화보다 플라즈마에서 발생된 오존(O₃)과 OH·라디칼 등에 의한 간접산

화를 통해 더욱 잘 일어남

- 그 이유는 첫째로, 전자에 의해 직접 산화되는 대기 중의 오염물질의 농도는 전자와 반응하여 라디칼을 생성시키는 대기 중의 산소나 질소, 수증기, 이산화탄소 농도보다 현저히 낮기 때문. 전자가 오염물질과 직접 반응할 기회가 많지 않기 때문에 전자에 의한 직접 산화율은 높지 않은 것으로 보임
- 둘째로, 라디칼은 타 물질과의 화학반응 속도가 크고, 전자보다 수명이 길기 때문에 작용범위가 비교적 넓으며, 따라서 오염물질과의 반응성이 커 오염물질의 간접 산화율을 높임

<표 2.4> 플라즈마 반응기의 특징

종 류	반응기의 특징
Pulse corona discharge	유전체 없이, 곡률이 작은 금속 표면에서 방전이 대규모로 일어남. 아크가 생기지 않도록 짧은 펄스를 지속적으로 공급해야함
Surface discharge	전극이 한쪽이 유전체에 부착되어 있는 형태로, 플라즈마가 유전체 표면 근처에서 발생함
Dielectric barrier discharge	전극과 유전체가 분리되어 있는 형태로, 코로나 방전이 유전체 사이에서 발생함
Dielectric packed bed reactor	저온플라즈마의 반응 효율을 높이기 위해 펠렛 형태의 유전체를 전극 사이에 충전한 형태

3.2. 악취 제어 기술

3.2.1. 악취 특징

○ 악취의 특성

- 악취란 황화수소, 메르캅탄류, 알데히드류, 아민류 등 자극성 있는 기체상태의 물질이 사람의 후각에 자극을 주어 불쾌감과 혐오감을 주는 냄새를 말함
- 아래의 표와 같이 냄새는 물질의 종류마다 차이가 있으며 원인물질에 따라 특성도 달라짐
- 또한 여러 물질이 복합적으로 작용하며, 주변 환경과 사람의 심리상태에 따라 냄새의 정도에 대한 인식이 달라질 수 있기 때문에 사람이 악취를 느끼는 정도를 구별하는 최소감지농도(TLV, Threshold) 또한 같은 물질에 대해서도 매우 상이함

<표 2.5> 주요 물질별 냄새의 특성

화합물	냄새 특성	원인물질명
황화합물	양파, 양배추 썩는 냄새	메틸메캅탄, 황화메틸, 이황화메틸 등
	계란 썩는 냄새	황화수소 등
질소화합물	분뇨 냄새	암모니아, 에틸아민 등
	생선 썩는 냄새	메틸아민, 드라이메틸아민 등
알데하이드류	자극적이며, 새콤하고 타는 듯한 냄새	아세트알데하이드 프로피온알데하이드 1-뷰티르알데하이드 1-발레르알데하이드 등

○ 최소감지농도

- 최소감지농도란 어떤 물질이 사람에게 냄새로 느껴지기 시작하는 최소의 농도로, 최소감지 농도 값이 작을수록 낮은 농도에서도 냄새가 발생하는 것이므로 강한 냄새를 가진 물질이라고 할 수 있다.
- 사람이 느끼는 약취강도가 달라 물질의 농도가 높다고 반드시 후각적으로 약취강도가 높은 것은 아니기 때문에 약취정도는 기기적인 분석을 통해 이루어져야 한다.
- 가장 일반적인 방법은 기기분석으로 얻게 된 물질농도를 그 물질의 최소감지농도로 나누어 예상 희석배수를 산정하는 것이다.

<표 2.6> 주요 화학물질의 최소감지농도

화합물	ppm	화합물	ppm
암모니아	0.1	o-자일렌	0.38
아세트알데하이드	0.002	m-자일렌	0.041
벤젠	2.7	p-자일렌	0.058
톨루엔	0.9	스티렌	0.03
에틸벤젠	0.17	아세톤	42

3.2.2. 악취 제어 기술

○ 일반적인 악취 제어 기술

- 일반적으로 악취물질을 제어하는 방법은 크게 물리화학적 처리기술과 생물학적 처리기술로 구분
- 악취물질은 가스와 휘발성의 대기 오염물질로 나눌 수 있음
- 가스와 휘발성 형태의 대기오염물질의 제거는 물리적, 화학적 그리고 생물학적인 원리에 의한 다양한 기술을 적용할 수 있음
- 다양한 기술적용을 통해 악취물질의 형태 변화부터 물리·화학적 분리를 통한 유해성 없는 물질로의 전환도 가능함
- 이를 간단하게 분류하면 아래의 표와 같으나 어떠한 제거방법도 모든 악취에 저감 효과가 뛰어날 수 없으므로, 악취의 성질, 성분, 발생 농도 등에 따라 적절한 방법을 적용해야 함
- 기술 분류 이전에 악취 제어 기술 방식을 크게 나누면 흡착, 흡수, 연소 등으로 나눌 수 있음

<표 2.7> 표준 악취처리기술

평가 관점	선정 기준
처리 가스의 특성	악취물질의 종류 악취물질의 농도 악취 운반 단위 처리가스의 질(온도, 습도 등) 안정성
설비기술	공법의 원리 필요한 운영비용 물질의 회수 반응산물의 최종 처리 법용성 성능 유연성 취급용이성 비용 측정
실적	적용사례 효율 운영기간 선호도

<표 2.8> 일반적인 악취방지기술

구분	악취제거법		악취제거 물질
물리적 방법	수세방식		물, 활성탄 현탁액
	흡착방식		활성탄, 제올라이트
	냉각 응축방식		수냉, 공냉
	희석방식		공기, 대기확산
화학적 방법	악액흡수방식	산화흡수방식	기상산화제(오존, 염소 등) 액성산화제(차아염소산나트륨, 과산화수소수 등)
		산·알칼리흡수법	산(황산, 염산 등), 염기(NaOH, 석회 등)
	화학흡착방식		이온교환수지, 염기성가스흡착제, 산성가스흡착제
	연소방식		직접연소법, 촉매산화법, 축열식연소법
고도산화 방법	중화제에 의한 방식		마스킹제, 중화제(식물정제유)
	오존산화 방법		활성 라디칼
	자외선(UV) 고도산화법		
	플라즈마 공정		
생물학적 방법	토양탈취		악취물질 분해 미생물
	활성오니 포기조방식		
	담체충진형		

3.2.2.1. 물리화학적 방법

○ 세정방식

- 물리화학적 방식으로 악취물질을 저감하는 기술 중 많이 사용되는 방식은 세정방식
- 세정은 악취기체와 액체를 접촉시켜 기·액간의 반응으로 악취를 전달하는 방식임
- 제거효율은 악취물질의 농도, 악취물질의 기·액 분배계수, 세정액의 물질전달 저항에 따라 결정됨
- 제거과정은 완전 물리적이므로 생물학적 처리와 같이 갑작스러운 제거율 저하는 없음
- 세정방식에는 알칼리성 세정, 알칼리 산화성 세정, 촉매 세정 등이 있음

○ 알칼리성 세정

- 알칼리 세정은 알칼리를 증가시켜 세정에 의한 악취물질을 향상시키는 공정으로, 주 대상 악취물질은 황화수소(H₂S), 메틸메르캅탄(MM) 등이 있음
- 그러나, pH가 10보다 큰 경우에는 세정액으로부터 침전물이 형성될 수 있어 세정기에 장애를 유발하며 유지비용 증가의 단점이 있음

○ 알칼리 산화성 세정

- 알칼리 산화성 세정은 알칼리 세정의 단점을 보완하기 위하여 pH를 조절하면서 pH 9~10 범위에서 운전되게 하는 방식으로 이 pH범위에서는 침전물이 생성되지 않음
- 알칼리 산화성 세정은 여러 종류의 유기 황화합물(VOSCs)의 처리에 이용됨

○ 촉매 세정

- 촉매 세정은 산소분자의 산화력을 활용하기 위하여 특정 금속의 촉매 성질을 이용하는 방식임
- 고정상 또는 현탁 반응조에서 제1철을 제2철로 산화시키는 박테리아를 이용한 단계를 추가할 수 있음

○ 흡착법

- 흡착법은 오염가스 내의 흡착 대상물을 활성화된 흡착제의 경계면 표면에 부착 및 고정시켜 악취물질을 제거하는 기술
- 흡착제는 내부 표면적이 큰 다공성의 물질로 흡착하는 대상에 대한 선택적 친화력을 가지기 때문에 제거하려는 대상가스와의 흡착여부를 잘 파악함
- 흡착법의 효율은 탁월하나 대용량의 고농도 가스를 처리하면 흡착제의 재생 탈착 과정이 필요하므로 제거가스의 농도가 약 5 ppm 이하의 낮은 농도의 가스를 처리하는 것이 일반적임
- 흡착제의 종류는 실리카겔, 알루미나, 활성탄 등이 있는데 그 중에서 가장 일반적으로 많이 쓰이는 것은 활성탄
- 활성탄을 제외한 흡착제는 분자구조상 전기적인 극성을 가지기 때문에 극성을 띄는 화합물과의 흡착력이 월등히 높음
- 특히 물은 강한 극성을 가진 물질로서 상황에 따라 대기 중에 수만 ppm까지 존재하므로 극성을 따라 흡착제가 작용한다면 정작 흡착대상 물질의 흡착은 방해받게 됨

- 활성탄은 무극성이기 때문에 마찬가지로 무극성물질인 유기용제나 극성이 약한 물질들을 잘 흡착함

○ 흡수법

- 흡수법은 오염 가스에 들어있는 휘발성 물질을 흡수액과 접촉시켜 악취물질을 액상에 용해시키거나 화학적 반응을 통해 가스 내 악취물질을 제거하는 기술
- 제거효율은 기체와 흡수액의 접촉면적과 접촉시간, 흡수액의 농도와 반응 속도, 물에 대한 기체의 용해도와 관계가 있음
- 흡수법은 대표적으로 두가지 방법으로 나뉜다. 오염된 가스를 중화시켜서 액상에 고정시키는 중화법과 산화시켜서 오염 가스를 무취, 무해화 시키는 산화법임
- 중화법은 암모니아의 산세정이나 불소, 염화수소, 황화수소 등의 산성가스를 알칼리 세정시키는 것으로 응용되고 있음
- 산화반응에서 탈취제 역할을 하는 흡수액은 차아염소산용액, 염소수용액, 이산화염소, 과망간산 칼륨용액 등이 있다. 산화반응은 화학제품 공장이나 아스팔트 악취 등의 저감에 적용됨
- 흡수법의 악취물질 제거효율은 가스 내에 존재하는 악취원인 성분의 형태나 크기 등에 많은 영향을 받음
- 악취원인 성분이 미세입자상이어서 물에 대한 용해도가 높으면 제거효율이 높겠지만 일반적인 악취가스인 유기계는 물에 대한 용해도가 낮고 낮은 농도에서는 취기를 잘 느끼지 못하기 때문에 완전한 제거가 어려움
- 때문에 다른 악취처리법과 조합하여 전처리 방식으로 적용되고 있음

○ 연소법

- 연소법은 가연성 악취가스를 고온으로 연소시켜 가스 중의 악취물질을 이산화탄소와 물로 산화 및 분해시키는 것임
- 대표적으로 직접 연소법, 촉매 연소법을 사용하는데, 특히 촉매법은 촉매를 사용하여 반응온도를 낮추고 반응속도를 높이는 것이다. 촉매 연소법에 비해 직접 연소법은 좀 더 고온에서 이행되고 있음



- 직접연소법(After Burner)은 가연성분을 함유한 악취가스를 연료를 이용하여 700℃이상에서 연소시켜 탈취하는 방법으로, 연소에 의해 H₂O, CO₂ 등의 무해, 무취 화합물로 변화시킴

- 직접연소법은 도시가스나 등유 등의 연료가 필요하므로 운전비용이 많이 소요되며, 고온과 일정한 체류시간에서 처리되어야 하므로 일반적으로 유량이 적은 고농도의 배기가스 처리에 적합함
- 직접연소법은 또한, 대부분의 악취물질에 대해 적용될 수 있지만, 할로겐계 물질에 대해서는 처리할 수 없는 경우도 있음

○ 촉매산화법

- 촉매산화법은 직접연소법과 같이 악취성분을 산화·분해시켜 탈취하는 방법이지만 비교적 낮은 온도 범위에서 산화시키는 것이 특징임.
- 따라서 연료비가 직접 연소법에 비해서는 적게 들지만 촉매독으로 인한 기능저하나 폭발 위험성 등의 문제가 있음
- 대표적인 촉매독으로 중금속, 황산화물, 유기 실리콘 등인데 촉매독을 피하고 촉매의 수명을 장기간 유지하기 위해서는 배출가스의 성상을 미리 알고 정확한 전처리를 하는 것이 중요함

<표 2.9> 흡수 화학물질의 사용

용매	반응물질	처리대상 악취물질
물		암모니아 아세톤 메탄올 에탄올 염소
물	염소 염화나트륨 차염화나트륨 브롬화나트륨 과망간칼륨 과산화수소 오존 소다액 황산	혼합 악취물질
물	디에탄올아민 탄산칼슘 탄산나트륨	황화수소
물	과산화수소	이산화황

3.2.2.2. 생물학적 방법

- 생물학적 처리방법에는 크게 생물여과(biofilter), 살수여상, 생물세정(bioscrubber), 활성슬러지법이 있음
 - 생물학적 처리에 의한 악취제거 기술은 순응된 미생물을 산소 공급원인 황화합물을 황산염 또는 원소 형태의 황 등과 같이 악취가 발생하지 않는 물질로 산화시킴
 - 생물학적 처리는 물리학적 처리에 비해 산화제와 촉매제를 사용하지 않으므로 비용지출이 없으며, 일반적으로 소요되는 에너지 비용이 적으므로, 운전 비용이 적게 소요된다는 장점이 있음
- 생물여과(biofilter)방법
 - 생물여과는 미생물이 존재하는 매개체를 구조물에 고정시켜 악취를 제거하는 방법
 - filter 내에 액체 상태로 존재하는 물질을 없애므로 악취물질의 용해도는 운전 시 중요하지 않음
 - 황 함유 혼합물에는 매우 효과적이거나, 질소 계열의 경우는 효과를 기대하기 어려움
- 살수여상 방법
 - 살수여상 방식은 미생물의 활동이 액상에서 일어남
 - 미생물 군집이 지지층에 생물막을 형성하고, 액체는 영양물질을 공급하며, 악취제거를 위한 1차 매개체로 작용
 - 살수여상의 경우 액상을 이용하는 만큼 악취물질의 용해도가 중요하며, 악취물질의 기액 분배가 주요 장애요인으로 지적되는 단점이 있음
- 생물세정 방법
 - 생물세정은 액상을 이용하는 방식으로 악취 처리가 완전히 액상에서 이루어짐
 - 따라서, 기액에서 교환기 내 액상 매개체로 분배되는 정도에 따라 처리효율이 크게 좌우됨
 - 생물세정은 pH, 온도 및 영양물질의 제어가 용이하며, 미생물 대사로 인한 생성물의 제거가 용이하다는 장점이 있음
 - 반면, 악취의 상당수는 휘발성과 용해도가 낮으므로 액상을 이용하는 생물세정기의 적용이 어렵다는 단점을 가지고 있음

○ 활성슬러지 방법

- 활성슬러지를 이용한 악취 처리기술은 일련의 악취 정화 메커니즘에 의하여 악취가 제거됨
- 첫 번째 단계는 혼합액으로서의 악취 물질의 흡수임. 이 과정에서 악취 물질의 흡수 효율은 유입되는 악취 기체의 기포 크기와 기체의 체류시간에 의한 제한이 있음
- 두 번째 단계는 슬러지 내 미생물 플럭에 의한 흡착임. 용해도가 낮은 고분자 화합물은 미생물의 플럭에 의해 제거가 가능함
- 마지막 단계는 악취 물질의 응축단계임. 응축은 따뜻한 기체가 차가운 혼합액과 접촉 시 발생하며, 응축된 악취물질은 액상에서 미생물학적 분해에 의해 제거됨

<표 2.10> 생물학적 처리의 장단점

처리 방법	장점	단점
생물여과 (biofilter)	<ul style="list-style-type: none"> • 운영이 간단 • 높은 표면적 • 폐수 발생량이 적음 • 낮은 압력손실 	<ul style="list-style-type: none"> • 운전 조건 조절이 어려움 • 넓은 공간 요구 • 수분량 조절 어려움 • 유입가스 유량 변경 시 적응 기간 필요 • 세척이 어려움
살수여상 (biotrickling filter)	<ul style="list-style-type: none"> • 운전 조건 조절이 쉬움 • 세척이 쉬움 • 낮은 압력손실 • 간단한 구조 • 산소 교환율이 높음 • 이물질이 적음 	<ul style="list-style-type: none"> • clogging 발생 • 폐수의 발생 • 낮은 표면적 • 높은 운영비용
생물세정 (bioscrubber)	<ul style="list-style-type: none"> • 세척이 쉬움 • 낮은 압력손실 • 간단한 구조 • 다른 기술과 접목이 용이함 	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 운영비용 • 낮은 표면적 및 교환율 • 잉여 슬러지 발생 • 공급 산소 요구 • 이물질 세척 어려움

3.2.3. 본 연구에서의 악취제어 적용 기술

○ 저온 플라즈마/촉매법 동시 적용

- 본 연구에서는 저온플라즈마 및 촉매를 동시에 적용하여 미세먼지가 포함된 악취를 저감하고자 함
- 악취제거에 촉매를 이용하면 여러 반응 경로에서 원하는 물질에 대해 물질의 활성화 에너지를 낮출 수 있으므로 반응을 선택적으로 제어할 수 있음
- 촉매 산화제는 반응과정에서 스스로 소모되지 않으면서 반응속도를 변화시키는 물질로써, 반응이 진행되는 과정에 필요한 활성화 에너지를 변화시켜 반응속도를 변화시키는데 필요함

4. 저온 플라즈마 처리기술 현황

4.1. 저온 플라즈마

4.1.1. 고도산화 방법

○ 고도산화 방법

- 악취물질 제거기술 중 물리화학적 방법에는 고도산화 방식이 있음
- 이 방법은 악취를 포함한 기체에 자외선, 오존, 플라즈마와 같이 강한 산화력을 가지는 물질을 투입하여 악취물질을 분해하는 방식
- 최근 고도산화법을 적용한 시스템의 효율성이 지속적인 연구를 통하여 개선되면서 직접연소법의 대안기술로 대두되고 있음
- 이 중 플라즈마(Plasma) 반응기는 투입되는 에너지 밀도를 조절하기 간편하고, 소형화가 가능하여 가정용 공기청정기나 소규모 사업장 등 적용범위가 넓어지고 있음

○ 플라즈마 공정

- 플라즈마 공정은 운전되는 온도 조건에 따라서 고온플라즈마(Thermal plasma)와 저온플라즈마(Non-thermal plasma)로 구분됨
- 고온플라즈마와 저온플라즈마는 아래에 나타나는 표를 통하여 그 특성을 비교함
- 고온 플라즈마는 높은 온도에서 운전되므로 모든 물질이 열적 평형상태에 있으며, 주로 고온 용융을 이용한 폐기물 처리에 이용됨

- 저온 플라즈마는 상온에서 운전 가능한 기술로서, 전기장 내에서 전자가 강력한 에너지를 가지고 가속되어 물리화학적 반응을 일으키는 상태에서 산화물질인 라디칼과 오존 등을 발생시켜 주로 대기오염물질을 처리하는 기술임

<표 2.11> 고온플라즈마와 저온플라즈마의 비교

구분	고온플라즈마 (Thermal Plasma)	저온플라즈마 (Non-thermal Plasma)
발생원	아크방전	글로우, 코로나 방전
전원	DC, AC, RF 10~500V, 1~10 ⁵ A	DC, AC, RF, MW 10~100kV, 10 ⁻⁴ ~10 ⁻¹ A
온도	Te=Ti=Tg=10 ³ ~10 ⁵ K local thermal equilibrium high thermal capacity	Te=10 ⁴ ~10 ⁵ K, Ti=Tg=10 ³ A non-equilibrium low thermal capacity
플라즈마 밀도	10 ¹⁶ ~10 ¹⁹ /cm ³	10 ³ ~10 ¹³ /cm ³
압력	10 ⁴ ~10 ⁶ Pa	10 ⁻² ~10 ² Pa(glow), 10 ⁴ ~10 ⁵ Pa(corona)
균일도	medium	high(glow), low(corona)
역할	고온용융을 이용한 폐기물 처리	물리화학적 산화반응을 이용한 대기오염물질 산화

4.2. 저온 플라즈마의 원리

4.2.1. 플라즈마 원리

- 기체에 고압의 전기 반응을 행했을 때 방전에 의해 발생된 전자가 기체를 구성하는 분자와 충돌하여 기체 분자의 외각 전자상태가 변하고, 이에 따라 반응성이 풍부한 화학적 라디칼, 여기분자, 이온 등은 전기적으로는 양 도는 음으로 하전되어 전기적으로 중성상태의 기체가 되는 반응을 저온 플라즈마 반응이라고 함
 - 저온 플라즈마의 기체 온도는 상온에 가까움
 - 발생하는 전자의 온도만 높기 때문에 고온을 적용할 필요가 없는 대기오염물질 처리에 주로 사용됨
 - 상온 대기압 상태에서 운전이 가능하기 때문에 장치가 간단하고 다양한 화학반응을 유도할 수 있음
 - 저온 플라즈마 반응의 일상적인 예로는 형광등을 들 수 있음

4.2.2. 저온 플라즈마 공정

- 저온 플라즈마로 처리되는 기체 온도는 1,000K 미만인 반면, 플라즈마 반응으로 생성되는 전자의 온도는 대략 10,000 ~ 100,000K의 범위에 있음
- 10,000 ~ 100,000K의 전자온도는 대략 1~10eV의 전자 에너지에 해당하며, 이는 전자가 대기 중의 O₂, N₂ 및 H₂O 분자와의 충돌과정(collision 또는 interaction)을 통해 유해가스 분자와의 반응도가 큰 O, N, OH, HO₂ 라디칼을 발생시킬 수 있는 에너지
- 따라서, 저온 플라즈마는 낮은 기체의 온도조건, 즉, 배기가스의 전체적인 엔탈피를 증가시키지 않는 조건에서도 유해가스를 처리할 수 있는 화학적 활성종(chemical active species)을 발생시킬 수 있음
- 이는 화학반응에 필요한 활성온도를 낮추어주는 촉매의 역할과 유사하기 때문에 일부 연구에서는 저온 플라즈마 공정을 플라즈마로 유도된 촉매공정이라고 부르기도 함

4.2.3. 저온 플라즈마 에너지

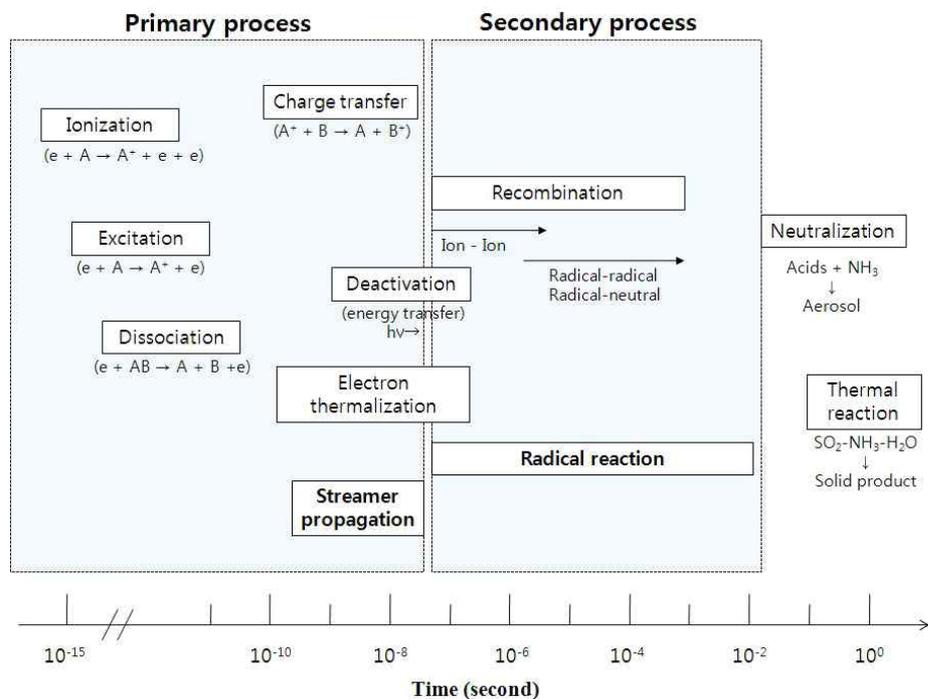
- 저온 플라즈마의 가장 큰 특징인 플라즈마를 구성하고 있는 입자들인 전자, 이온 및 극성이 없는 중성의 기체분자 중에서도 전자의 온도가 다른 입자들에 비해 높다는데 있음
- 전자는 이온 및 중성 기체분자에 비해 수천분의 1에 불과할 정도로 질량이 가볍고 전기적 극성을 가지고 있으며, 이러한 전자는 외부로부터 가해진 전기장이 되어 전자의 운동 에너지를 증가시킬 수 있음
- 따라서, 특정한 압력 및 전기장 조건에서는 플라즈마에 공급된 에너지 가운데 상당량이 전자의 운동에너지로 변환될 수 있으며, 이의 결과로 다른 에너지는 크게 증가되지 않은 상태에서 전자의 에너지만 선택적으로 증가할 수 있음

4.2.4. 저온 플라즈마 반응

- 저온 플라즈마는 전자, 이온, photon, 라디칼, 오존, 여기된 중성 기체분자(excited neutral gas molecules), 온도가 높아진 중성의 기체 분자 등으로 구성됨
- 대기압 조건에서 발생된 저온 플라즈마는 이온 및 중성기체분자의 에너지가

직접 화학반응을 유도할 만큼 크지 않기 때문에 이들 입자가 유해가스를 처리하는 과정에서의 역할은 크지 않음

- 또한 저온 플라즈마로 발생된 photon, 가운데 화학반응을 직접 일으킬 만큼 큰 에너지를 가진 photon(300nm 이하의 파장을 갖는 빛)은 대기압 조건과 같이 기체 분자의 밀도가 높은 조건에서 주변 기체분자에 곧바로 흡수되기 때문에 유해가스에 미치는 영향이 크지 않음
- 따라서 저온 플라즈마의 경우 유해가스의 화학반응에 주된 영향을 미치는 입자는 전자 및 라디칼이라고 볼 수 있음



<그림 2.8> 저온 플라즈마의 기본 과정

4.2.5. 저온 플라즈마 라디칼 반응

- 대부분 저온 플라즈마가 처리하는 유해가스는 대개의 경우 수백 ppm 이하로 저농도가 대부분이며, 이들은 라디칼과의 화학 반응 속도가 큼
- 위와 같은 조건의 유해가스가 처리되는 과정은 저온 플라즈마로 발생된 전자들이 산소, 질소, 수증기 및 이산화탄소와 반응하여 O, N, OH, HO₂와 같은 라디칼을 발생시키는 단계 및 반응성이 강한 라디칼이 ppm 단위의 저농도 유해가스와 반응하는 단계로 구분됨

- 이 조건에서 플라즈마 반응으로 생성되는 전자들의 직접적인 반응이 전체 처리과정에서 미치는 영향은 크지 않다고 판단되는데, 이유는 배기가스 내에서 처리 대상 물질인 유해가스 농도는 수 백 ppm 단위로 작은 반면, 전자와의 반응을 통해 라디칼을 발생시키는 산소, 질소, 수증기 및 이산화탄소의 농도는 각각 수십% 수준에 이르기 때문에 전자와 유해가스가 직접 반응할 기회가 많지 않고, 라디칼에 비해 전자는 수명이 짧기 때문에 플라즈마가 발생한 공간 주위에만 존재하여 작용 범위가 넓지 않음
- 따라서 유해가스를 처리하는 과정에서 플라즈마를 통해 전자 및 라디칼을 충분히 반응시켜도 유해가스를 처리하는 과정에서 플라즈마를 통해 전자 및 라디칼을 충분히 반응시켜도 유해가스와 전자보다는 라디칼이 훨씬 더 활발한 작용을 하게 되고, 만약 라디칼의 반응속도가 낮은 경우에는 유해가스의 처리효율이 낮게 나타나게 됨

4.2.6. 라디칼에 의한 악취물질 산화

- 다양한 물리화학적 요인에 의해 라디칼의 산화효율이 결정되며, 플라즈마에 의한 반응 효율에 영향을 미치는 운전 조건은
 - 첫 번째, 비에너지 투입량(specific input energy)
 - 두 번째, 오염기체의 화학 조성
 - 세 번째, 플라즈마 반응기 구조
 - 네 번째, 플라즈마에 유입되는 전압과 주파수 등

4.3. 저온 플라즈마의 분류

4.3.1. 플라즈마 반응기의 종류

- 저온 플라즈마 반응기는 공급되는 전원의 종류(pulse, DC, radiofrequency, microwave)와 내부 구조에 따라 Pulse corona discharge 방식, Surface discharge 방식, Dielectric barrier discharge 방식, Plasma-driven catalyst 방식으로 나눔

<표 2.12> 플라즈마 반응기의 특성

반응기 종류	반응기 특징
Pulse corona discharge	<ul style="list-style-type: none"> 전기를 짧은 펄스로 공급하여 코로나 방전을 유도 유전체가 없는 경우 일반적인 전기집진기 원리와 동일
Surface discharge	<ul style="list-style-type: none"> 코로나 방전극과 유도극 사이를 0.5mm로 유지 Ceramic 유전체를 이용하여 고에너지 방전을 일으켜 고농도의 오존 생성이 가능
Dielectric barrier discharge	<ul style="list-style-type: none"> 유리, 석영, alumina 등의 유전체를 전극 사이에 두고 방전을 일으키는 방식
Plasma-driven catalyst	<ul style="list-style-type: none"> 저온플라즈마 반응 효율을 높이기 위해 금속 촉매를 반응기 내부에 충전한 형태

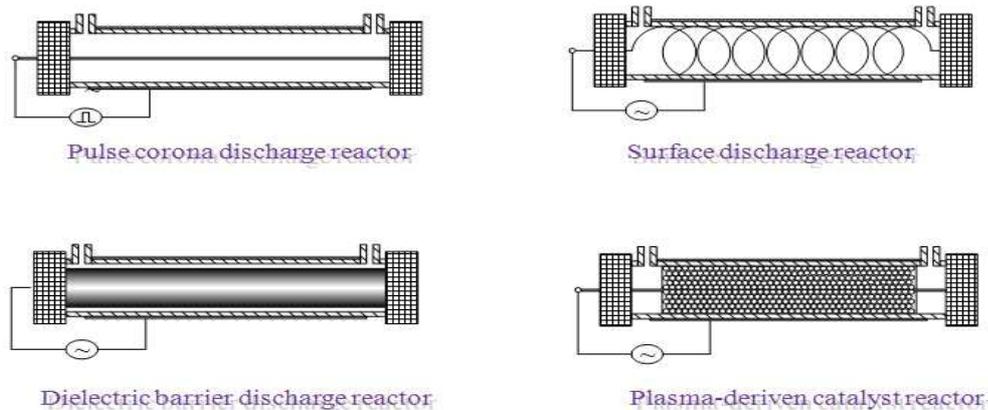
4.3.2. 대기환경에서 가장 활용되는 저온플라즈마 반응기 특징

- Pulse corona 방식과 DBD 방식은 대기환경기술에서 가장 일반적으로 사용되고 있음
- Pulse corona 방식
 - Pulse corona 방전은 곡률반경이 상이한 한 쌍의 금속 전극으로 된 반응기에서 발생함
 - 펄스 전원에 공급되는 전압의 폭은 대개 수백 nano초 내외이며, 이보다 짧은 펄스의 폭은 시스템의 임피던스 및 전원장치의 기술적 난이도 문제고 구현하기가 쉽지 않고, 펄스폭이 길 경우에는 코로나에서 아크(arc)로 방전모드가 이행되는 경우가 많음
 - Pulse corona는 DC corona에 비하여 방전이 개시되는 전압을 높일 수 있고, Arc 발생이 잘 일어나지 않는다는 특성이 있음
 - 이에따라 Pulse corona는 DC corona보다 높은 전기장에서 발생되며, 전자 에너지의 에너지가 상대적으로 높기 때문에 화학반응에 유리하다는 장점이 있음
 - 또한 양극의 펄스 전력을 통해 발생한 코로나는 길이가 긴 스트리머(Streamer) 형상을 가지며, 이에 따라 유해물질과 반응을 통해 발생한 라디칼이 반응할 수 있는 공간이 DC 전력을 이용한 경우보다 큰 장점이 있음
 - 한편, DC 고전압을 이용한 경우는 전기 집진기와 같이 전극 주위에만 발생

하는 Glow corona가 발생되며, 이런 경우에는 화학반응을 일으키는 공간이 제한적이기 때문에 반응 공정에 불리함

○ DBD(Dielectric barrier discharge) 방식

- DBD 방전기술은 19세기 후반 오존 발생기에 적용된 이후 오늘날까지 오랜 기간에 걸쳐 연구·발전되어 왔음
- DBD에 사용되는 전극은 한 쌍의 금속 전극 사이에 세라믹 판과 같은 전기적인 절연체이자 유전체를 끼워 넣은 구조인데 유전체의 역할은 과도한 전류가 흐르는 arc를 방지함과 동시에 교류 전원을 공급받아 전기적인 충전 및 방전을 반복적으로 수행하는 것임
- DBD에 공급하는 전원으로는 고전압 교류전원장치를 일반적으로 사용하며, 간혹 펄스 전원을 사용하기도 함
- 일반적으로 유전체에 가해줄 수 있는 전기장의 세기(kV/cm)는 유전체 재료가 견딜 수 있는 재료의 한계로 인해 제한을 받기 때문에 반응기를 제작할 때 유전체의 두께, 전극의 간격 및 공급전압 및 주파수에 세심한 고려가 필요함
- DBD 반응기에서 일어나는 방전은 유전체 전극간의 간격 길이가 수 mm이하로 작기 때문에 streamer corona와 같이 길이가 10cm 이상 길어질 수 있는 큰 스케일의 방전이 아니라 크기가 작고 단위 면적당 방전의 개수가 많은 미세방전에 가까움
- 이와 같은 미세 방전의 특성은 미세 방전을 통해 발생된 전자들이 갖는 평균 전자 에너지는 이론적인 계산 및 광계측 실험 결과 pulse corona보다 1~2eV 정도 작은 것으로 판단되며, 수명(life-time)은 1~10nano 초임
- 미세방전은 교류 전압이 상승하거나 낮아지는 특정기간 동안 수 십 내지 수 백번 발생하며, 단위 면적당 다수의 미세방전을 발생시킬 수 있어 반응기 전체적으로 pulse corona에 비해 균일한 특성을 갖는 플라즈마를 발생시킬 수 있음



<그림 2.9> 일반적인 저온플라즈마 반응기

4.4. 저온 플라즈마의 장단점

4.4.1. 저온 플라즈마 공법의 장점

- 저온 플라즈마 공법은 상온 대기압 하에서 운전이 가능하며, 악취 처리 효율이 높고, 다른 기술과의 접목이 유리하여 다양한 형태의 하이브리드 기술이 가능하다는 장점이 있음
- 저온 플라즈마는 산화 물질을 이용한 대기오염 물질의 저감에 주로 사용되었으며, 주로 질소산화물(NOx)이나 황산화물(SOx)의 제거에 이용되었고, 최근에는 VOCs 및 악취 저감에 적용하고자 연구를 다방면으로 진행하고 있음
- 그러나 저온 플라즈마를 악취 및 VOCs 제어에 적용하는 경우 몇 가지 문제점이 발생하며, 이를 해결하기 위한 공학적인 해결책이 제시 되어야만 저온 플라즈마 기술을 악취물질 제어에 사용할 수 있음

4.4.2. 저온 플라즈마 공법의 단점

- 저온 플라즈마 공법을 악취 제거에 도입할 경우, 플라즈마 자체만으로는 투입되는 에너지에 비해 악취물질 산화 능력이 떨어짐
- 이를 보완하기 위하여 일부 연구에서는 TiO₂와 같은 금속 촉매와 함께 사용하였는데, 금속 촉매를 장시간동안 사용하게 되면 촉매독이 작용하여 오히려 분해효율이 떨어짐
- 또한, 저온 플라즈마 작용에 의해 악취 대상 물질의 농도를 감소할 수 있음

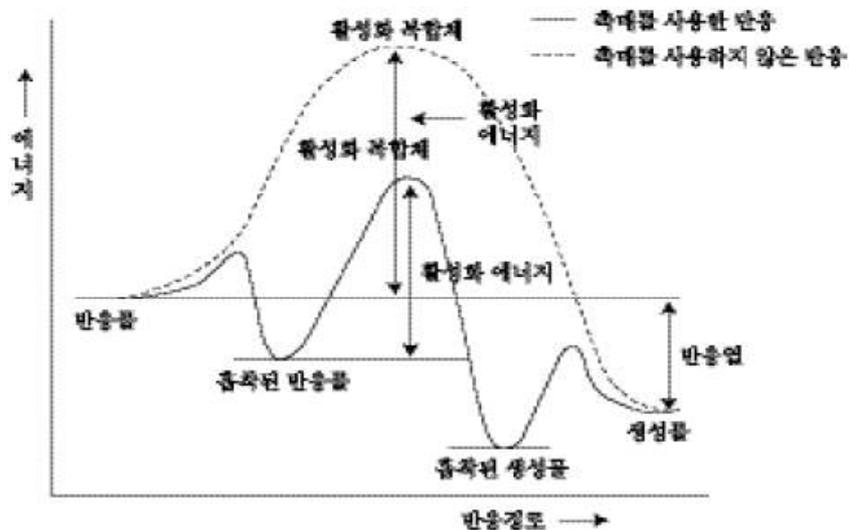
나, 산화작용에 의한 기타 부산물이 배출 가스에 포함되면 또 다른 대기오염 문제로 작용할 가능성이 있음

- 특히 산화물질로 발생하는 오존이 악취 처리에 사용되는 양보다 훨씬 초과된 농도로 발생하기 때문에, 이를 재처리하지 않으면 광화학 스모그의 원인 물질로 작용할 수 있는 옥시던트(oxidant)로 작용하기 때문에 플라즈마를 공정에서 사용하였을 경우 이를 저감하기 위한 후처리가 필요함

5. 저온촉매 개발현황

5.1. 촉매산화 원리

- 촉매는 아래의 그림에서 보여주는 바와 같이 화학반응을 일으키는데 필요한 활성화 에너지(activation energy)를 낮추어 비교적 낮은 온도에서 화학반응 속도를 촉진하는 물질을 말함
 - 촉매연소 반응은 공기 중에 있는 산소를 사용하여 산화반응을 일으키는 것을 말함
 - 예를 들어 VOCs와 같은 탄화수소(HC) 물질들은 통상 공기 중에서 700 ~ 800℃가 되어야만 산소와 반응하여(산화) 정화처리 되지만, 백금(Pt)·로듐(Rh)·팔라듐(Pd) 등과 같은 산화촉매를 사용하게 되면 200 ~ 400℃ 정도의 낮은 온도에서 산화반응이 일어나게 됨



<그림 2.10> 촉매의 기능

5.1.1. 촉매산화기술 특징

- 활성이 높고 표면적이 큰 촉매 사용으로 탈취효율이 높으며, 취기 및 폐가스를 무독 무취한 탄산가스와 수증기로 분해하므로 2차공해가 적으며 촉매는 재생 후 재사용이 가능하고 촉매독이 없을 경우 수명이 긴 편임
- 저온산화 방식으로 연료소모가 적고 첨단 열회수 시스템 채택으로 경제성이 높으며, 금속촉매는 강도가 높아 다루기 쉽고 충격 등에 의한 파손이 없음
- 촉매산화법의 적용범위 : 인쇄, 도장 코팅 등의 오븐 및 기타 화학공정에서 발생하는 VOCs 또는 유기성 악취 등을 처리하는 방법으로 적용할 수 있음

<표 2.13> VOCs 및 악취 제거용 촉매

형상	Foam Metal	Honeycomb	Honeycomb	Pellet
담체물성	Ni-Cr 합금	Cordierite (SiQ-Al ₂ O ₃)	Cordierite (SiQ-Al ₂ O ₃)	γ-Alumina (γ-Al ₂ O ₃)
활성물질	Pt, Pd	Pt	Pd	Pt, Pd + Pd
표준크기 (mm)	440×590t×11	cell 150×t25, t50, t75 (100, 200, 400CPL)	cell 150×t25, t50, t75 (100, 200, 400CPL)	Φ 2~3 Φ 4~6
사용온도 (℃)	220~550(Pt) 250~700(Pd)	200~550	250~700	200~550
기계적 강도	Strong	Fragile	Fragile	Moderate
압력 손실	Middle	Low	Low	High
처리 효율	High	Moderate	Moderate	Moderate
표준공간속도 (1/hr)	40,000 ~50,000	30,000 ~40,000	30,000 ~40,000	20,000 ~30,000

※ 공간속도(SV : Space Velocity, 1/Hr) =
$$\frac{\text{Gas Flow Rate (Nm}^3\text{/Hr)}}{\text{Catalyst Volume (m}^3\text{)}}$$

5.2. 저온촉매산화 기술 특성

5.2.1. 금속촉매 산화기술 특성

- 촉매 소각은 연소기 내에 충전되어 있는 촉매가 연소에 필요한 활성화에너지를 낮춤으로서 비교적 저온에서 연소가 가능하도록 하는 연소방식으로 대개 직접소각의 경우 연소실의 온도를 800~900℃를 유지하여야 하나 촉매를 이용하면 아래의 표에서 보는 바와 같이 이 온도를 300~400℃로 낮출 수 있음. 결과적으로 촉매산화에 소요되는 연료비는 같은 성능의 열소각공정에 비해 저렴한 기술임

<표 2.14> Honeycomb형 백금촉매 사용시 연소 온도

Compounds	Oxidation temperature (°F)	90% Removal temperature (°F)
Hydrogen	68	68
Carbon Monoxide	302	302-392
Benzene	356	482-572
Toluene	338	482-572
xylene	392	482-572
Methyl Oxide	356	482-572
Ethanol	320	482-572
n-Heptane	320	482-572
Methyl Isobutyl Ketone	347	572-662
Methyl Ethyl Ketone	347	572-662
Dimethylformamide	392	662-752
Ethyl Acetate	527	752-842
Methane	572	752-842
Pyridine	65	752-842
Chlorobutane	797	842-932
Hydrogen sulfide	752	752-797
Carbon Disulfide	662	707-752

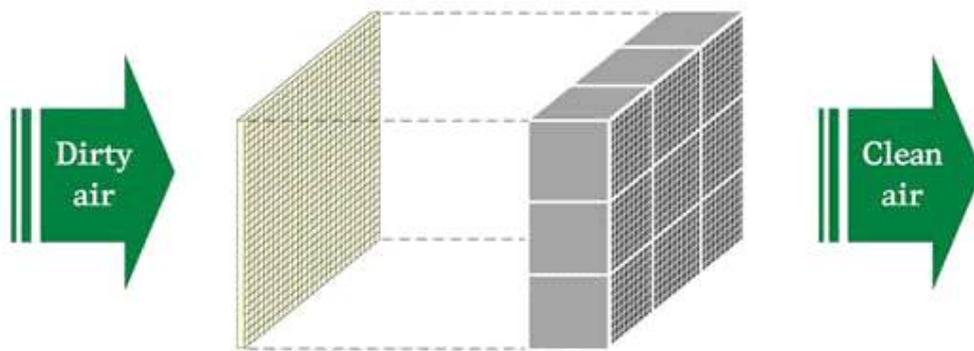
- 통상적으로, 이러한 오염 물질 제거에는 열에 의한 소각, 흡착제를 이용한 흡착법 및 촉매접촉 산화법이 사용됨
 - 열에 의한 소각은 높은 작업 온도 및 고 자본 설비가 요구되며, 열 소각이

- 라는 제거기술 상의 한계로 고온 유지에 따라 높은 유지비가 요구됨
- 특히 에너지 단가가 계속 높아지는 추세에 있으므로 앞으로는 더욱더 적용에 한계가 있음
- 열 산화조건에서 NO_x 발생이라는 이차 오염을 유발시킴
- 또한 배기 기체상에 할로겐화 화합물을 포함한다면, 열에 의한 소각 시 특정 작업 조건 하에서 유독성 할로겐화 화합물이라는 이차오염도 발생시킬 수 있음
- 널리 사용되는 방법 중 다른 하나는 활성탄소와 같은 흡착제를 이용하는 기술임
- 이 방법은 오염 물질을 분해하지 않고 단지 휘발성 유기화합물을 흡착제에 농축시킴
 - 이는 결국 흡착된 유해물을 다른 곳에서 어떤 방법으로든지 처리를 해야 하기 때문에 이차적인 시설이 필요하며 많은 양의 활성탄을 다른 곳으로 옮겨야 하므로 경제적이지 못함
 - 그리고 운반과정에서 휘발성 물질의 탈착으로 인한 안전문제 등 여러 문제점이 야기될 수 있음

5.2.2. 저온촉매 산화기술 현황

- 특히 활성탄의 흡착 한계로 처리 시 상당한 농도(수 ppm 이상)의 휘발성 유기화합물이 대기로 방출되고 있는 것이 현재의 실제 현장의 실정임. 또한, 흡착 효율은 기체 상 성분의 농도 변동에 의해 크게 영향을 받으며, 적용 사업장의 온도 변화가 심하든지 또는 상온보다 높은 온도에서 기체가 방출되는 사업장에서는 흡착에 의한 제거에 한계가 있음. 결국, 열 소각법과 흡착법에 의한 휘발성 유기 화합물의 제거는 여러 면에서 기술적으로 적용에 한계가 있고 경제적인 측면에서 어려움이 많음
- 향후 기술적인 추세로 기대되는 촉매 접촉 산화법은 앞에서 서술한 방법들과 비교 시 낮은 온도 산화반응으로 에너지 면에서 효율적이고, 이차 오염이 없으며, 이차적인 시설이나 운반이 필요 없는 경제적인 방법임
 - 촉매접촉 산화는 열에 의한 소각보다 상당히 낮은 온도에서 일어나며, 체류 시간이 짧아 작은 반응기로도 충분하며, 적용 시 전체적인 비용측면에서 훨씬 경제적임

- 이런 휘발성 유기화합물을 제거하는 기존의 촉매 제조는 주로 산화망간의 원료로서 과망간산칼륨의 수용액을 준비하고 그 수용액에 활성탄, 활성알루미늄, 활성실리카, 제올라이트, 규조토, 일반필터 등의 담체를 함침하여 산화망간계 촉매체를 제조출원번호 10-2003-0030145, 10-2003-0037425)함
 - 상기 제조방법은 제조된 촉매의 표면적이 담체를 쓰지 않은 경우와 비교 시 단위 무게 당 표면적이 적고, 촉매 활성 작용기(active sites)가 단위 무게 당 적게 생성되어 유기 화합물 제거 성능이 높지 않으며, 담체를 이용하지 않는 제조에서도 반응조건(상압 촉매 합성반응 후 산화)에 의하여 촉매의 활성 작용기 생성이 한정됨
- 즉, 기존의 산화망간계 촉매의 제조방법은 고온 공정을 채택하고 있어 장치의 규모가 크고 고가이며 복잡한 제조과정으로 인해 제조비용이 높고, 제조된 산화망간계 촉매의 단위 무게나 부피 당 촉매 작용기 및 표면적이 낮아 VOC 제거효율이 낮으며, 특히 고유가 시대를 맞아 고온 산화에 필요한 온도 유지를 위한 연료비로 인하여 시설 운전비용이 높은 점 등의 문제점이 있다.



<그림 2.11> 허니콤 촉매반응 모식(도)

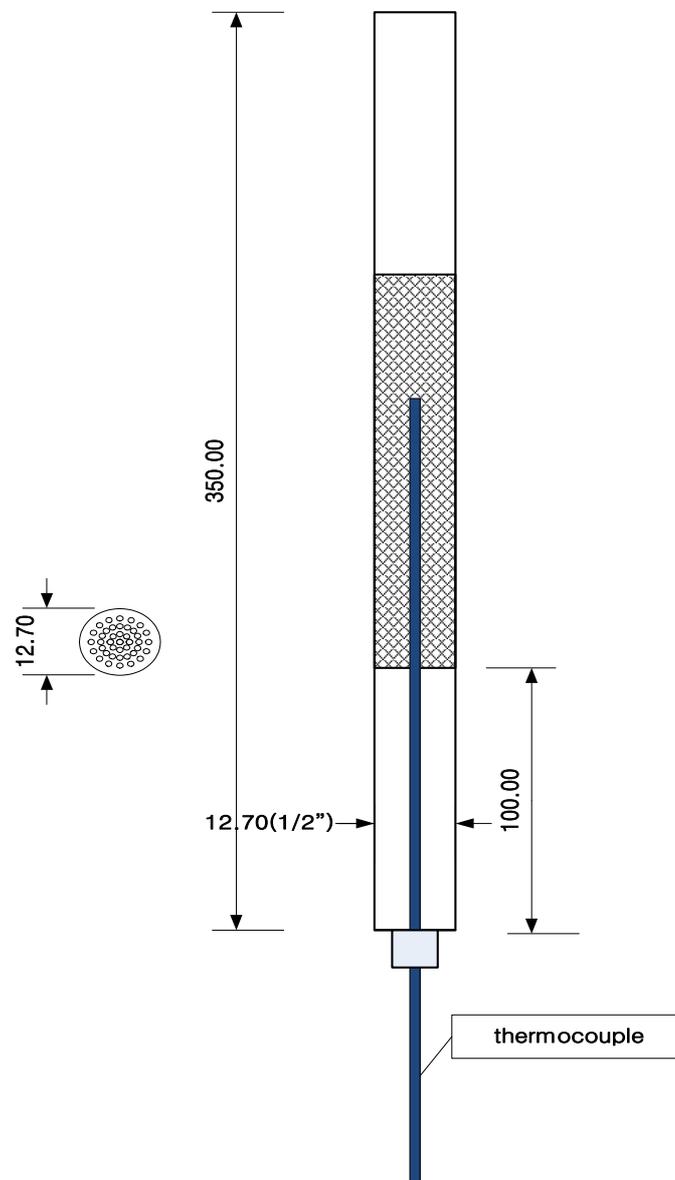
제 3장 Lab Scale Plant 설계 제작 및 실험

-
1. Lab Scale Plant 저온축매 반응기 제작
 2. 분석기기 및 방법
 3. 저온축매 VOCs 제거 효율
-

제 3장 Lab Scale Plant 설계 제작 및 실험

1. Lab Scale Plant 저온촉매 반응기 제작

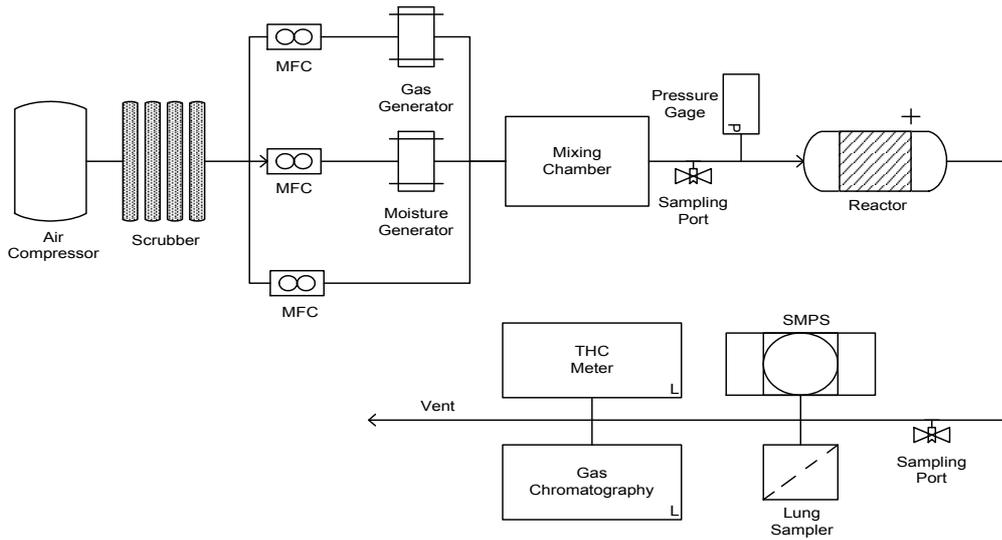
- 아래의 그림과 같이 Lab Scale Plant 촉매 반응기를 제작함
 - Stainless Steel 316L 재질의 1/2" 튜빙을 이용하여 반응기 제작
 - 촉매반응온도를 측정하기 위하여 반응기 하부에서 Thermocouple을 장착함
 - 반응기 내부에 펠렛형 촉매를 파쇄하여 투입 후 실험진행



<그림 3.1> Lab Scale Plant 촉매반응기 모식도

○ Lab Scale Plant 실험장치 구성

- Lab Scale Plant 실험장치는 아래의 그림과 같이 가스 공급장치, 믹싱챔버, 반응기, 측정분석장비 순으로 구성됨



<그림 3.2> Lab Scale Plant 실험장치 구성도

2. 분석기기 및 방법

2.1. 총탄화수소(THC) 분석

- 흡착장치에서 배출되는 단일 성분의 VOC 물질은 연속적으로 측정하기 위해 총탄화수소 측정기(THC meter: total hydrocarbon)를 Table 3-2와 같은 조건을 실시간 연속측정을 하였다.
- THC meter의 교정은 고순로 zero air(대산산업가스, Korea)와 2000ppm 메탄 표준가스(Rigas, Korea)를 이용하여 zero값과 span값으로 교정하였으며, 실험대상 물질별 보정은 물질별 표준가스(Rigas, Korea)를 이용하여 교정하여 흡착실험을 수행하였다.
- 측정된 데이터는 데이터로거(ALMEMO 2890, AHLBORN, GERMANY)에 수집하여 데이터의 실시간 저장 및 분석은 데이터로거의 컴퓨터 소프트웨어인 AMR WinConrol Data Acquistion 6.1버전을 이용하여 습도, 온도 등의 인자들과 시간에 따른 농도변화 특성을 분석하였다.

<표 3.1> THC meter 분석 조건

Maker	VIG Industries, INC	
Model	F.I.D. Model-10	
Condition	Air Pressure	3.5 psi
	Sample Pressure	C3 2.0 C1 3.0 psi
	Fuel(H2) Pressure	65.5 psi

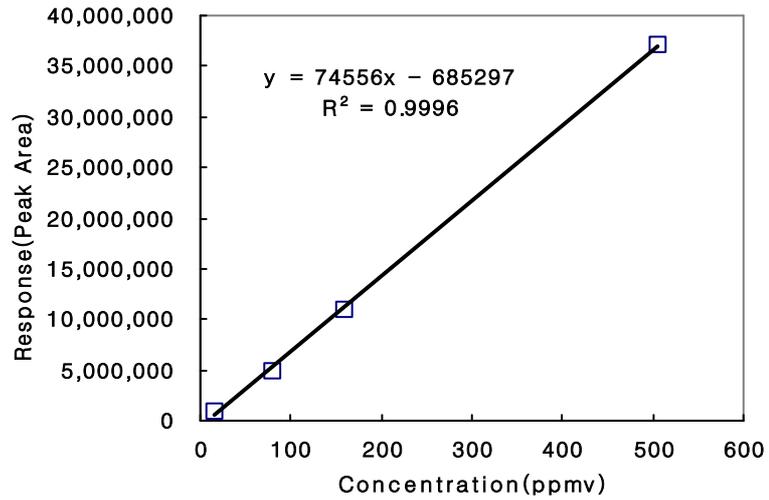
2.2. GC/FID 분석

- 흡착제의 흡착성능 및 파과특성을 파악을 위한 정성 및 정량분석은 GC/FID(DS6200, DS과학, KOREA)가 사용되었고, GC 컬럼은 RTX-1(60m×0.53mm×3μm)이 사용되었다. GC 온도 프로그램과 상세한 조건은 아래의 표에 나타냄

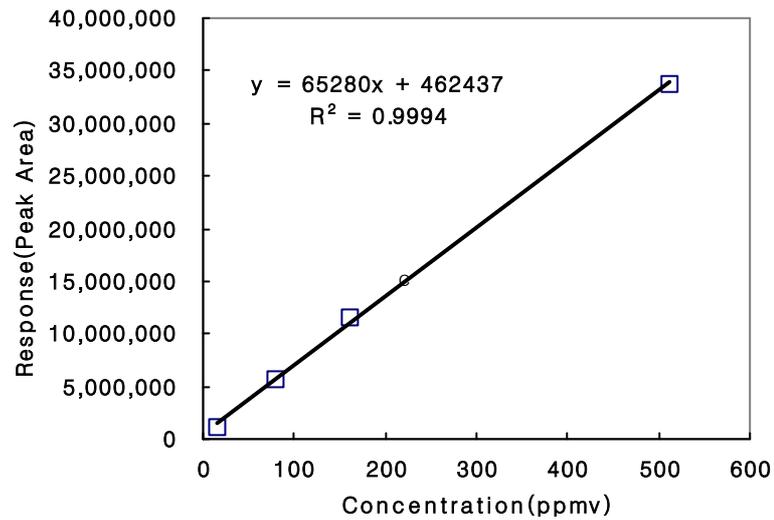
<표 3.2> GC/FID 분석 조건

Column	Type	RTX-1
	Length	60m
	I.D.	0.53mm
	Thickness	3 μ m
Oven Program	Initial Temp.	50 $^{\circ}$ C
	Temp. Rate	5 $^{\circ}$ C/min
	Final Temp.	80 $^{\circ}$ C
	Temp. Rate	10 $^{\circ}$ C/min
	Final Temp.	200 $^{\circ}$ C
	Final Time	10min
Inlet	Temp.	200 $^{\circ}$ C
	Split ratio	Splitless
Detector	Temp.	250 $^{\circ}$ C
	Air flow rate	300 mL/min
	H ₂ flow rate	30 mL/min
	Make up flow rate	30 mL/min
Carrier Gas	Gas type	Nitrgen(99.999%)
	Column flo`w rate	5.0 mL/min

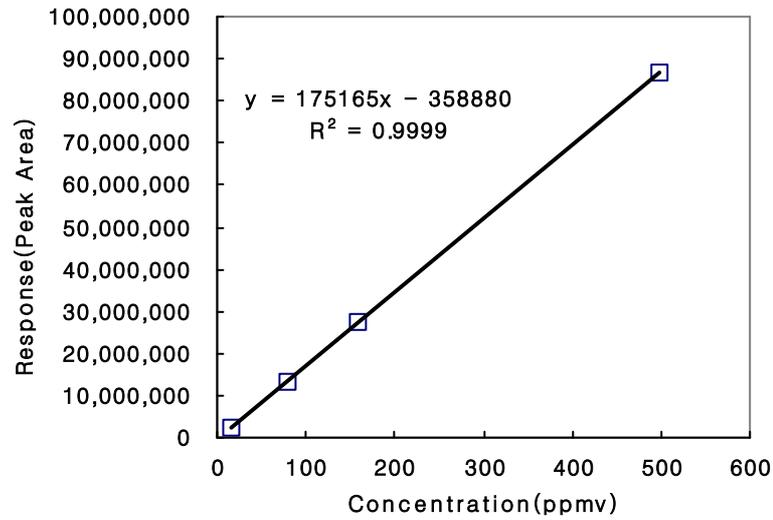
- 대상 VOC에 대한 검량선을 아래의 그림에 나타내었고 모든 대상 VOC인 toluene, MEK, EA의 검량선의 결정계수(r^2)가 0.999로 나타남



<그림 3.3> 벤젠의 검량선



<그림 3.4> 자일렌의 검량선



<그림 3.5> 톨루엔의 검량선

2.3. 미세먼지 측정

2.3.1. 대기오염공정시험기준

- 본 연구에서의 미세먼지 측정은 환경부의 배출가스 중 미세먼지(PM₁₀ 및 PM_{2.5}) 측정방법을 준용함
- 반자동식 채취기에 의한 방법으로 이 방법에서 사용되는 시료채취 장치는, 흡입노즐, 사이클론 결합장치(PM₁₀, M_{2.5}), 여과지 홀더, 피토관, 온도센서, 흡입관, 가열장치, 임핀저 트레인, 가스흡인 및 유량측정부 등으로 구성되어 있음
- 측정된 시료는 데이케이터에서 24시간 이상 건조시킨 후 6시간의 간격을 두고 무게를 측정하여 농도를 산출하였음
 - 현장 측정 전 및 현장 측정 후 무게차 및 유량을 이용한 중량농도 산출
 - 시료의 무게는 0.1mg까지 정밀하게 측정함



<그림 3.6> 대기오염공정시험기준에 따른 미세먼지 측정

2.3.2. 연속식 측정방법

- 미세입자는 이노서플 사의 InnoAir-615기기를 이용하여 저온 플라즈마 유입구, 저온 플라즈마 처리 후 배출구 및 저온촉매 산화장치 후단에서 측정함
- LABCO사 LYS-125는 광산란법(light scattering method)을 이용하여 유입되는 미세입자를 측정하는 방법임
 - 광산란방식은 입자상 물질에 빛을 조사했을 때 입자상 물질에 의해 산란되는 빛의 양을 측정하여 입자상 물질의 농도를 구하는 방법이다.
 - 입자상 물질의 물리적 성질이 동일할 경우 산란광의 양은 입자 질량농도에 비례하기 때문에 적용이 가능함
 - 미세입자의 실시간 측정이 가능하고 동시에 여러 입경의 미세입자 측정이 가능하나 입자의 비중이 고려되지 않고, 정확한 입경의 분리가 어렵기 때문에 여차가 발생할 수 있음
- 기기 사양 및 사진은 아래에 나타냄

<표 3.3> 미세먼지 측정기(InnoAir-615) 장비 사양

Instrument	InnoAir-615
Sampling Flow Size	1.5 LPM± 0.1 LPM
Particle Size	0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, and 10 μ g(PM _{1.0} , PM _{2.5} , PM ₁₀ μ g/m ³)
Concentration range	1,000,000 Particles/liter(Particle Counting Mode) ~ 1.0mg/m ³ (PM Mode)
Counting Efficiency	50%@0.3 μ m: 100%@ > 0.5 μ m(meets to ISO21501~4)
Light Source	Laser Diode, 780nm
Vacuum Source	Internal Vacuum Pump
Communication Mode	USB Serial, TCP/IP and Bluetooth
Accessory	T/RH Sensor, CO ₂ Sensor
Power	(입력)16.8 VDC ± 10%, 2.0A
Dimensions (LxWxH)	153mm x 190mm x 90mm (±1.0mm)

<표 3.4> 미세먼지 측정기(LYS-125) 장비 사양

Model	LYS-125
Measurement method	Light scattering
Light source	Laser Diode class III
Particulate matter	PM ₁₀ , PM _{2.5}
Out range	PM ₁₀ : 0~2,000 μ g/m ³
Data output(option)	Analog output 4~20mA (1Channel user selectable)
Digital output	RS-232
Heating controller	30~40 $^{\circ}$ C installed moisture remover
Resolution	$\pm 0.2\mu$ g/m ³
Sensitivity	0.1 μ g/m ³
Particle size range	0.3 μ m ~ 15 μ m
Flow rate	1.0 LPM
Data upload	10 sec (1 min cumulation data)
Display	Graphic LCD 128 x 64
Network interface	IEEE 802.3 Ethernet TCP/IP v4 Option : IEEE 802.11b/g Wireless LAN, IEEE 802.15.1 Bluetooth v2.0 Class2
Operating environment	14 $^{\circ}$ F~86 $^{\circ}$ F(-10 $^{\circ}$ C~50 $^{\circ}$ C), 20~98% RH
Storage environment	-4 $^{\circ}$ F~140 $^{\circ}$ F(-20 $^{\circ}$ C~60 $^{\circ}$ C), 98% \leq RH
Weigh	Body 5kg
Power	220VAC 220VAC, Wireless LAN
Calibration	Labco calibration system in accordance with ISO-21501-4
Calibration interval	Once a year or less (ISO 21501-4)



(a) Inoair-615



(b) LYS-125

<그림 3.7> 미세먼지 측정기기 사진

2.4. 온습도 및 유량 측정

- 유입되는 가스의 온·습도와 흡착 후 유출되는 가스의 온·습도 측정을 위하여 디지털습도계(MI70, VAISALA, FINLAND)를 사용하여 측정됨
- 실험에 사용된 MFC 및 유량 보정은 digital flow meter(BIOS, DryCal DC-Lite, USA)를 이용하여 검량하여 사용함
- MFC의 보정유량 교정은 BROOKS사의 Model 5850E, Installation and Operation Manual을 참고하여 기기에 부착된 span, zero, linearity 가변저항을 드라이버와 테스터기를 이용하여 보정을 수행하였으며, 보정조건은 유입압력 0.3Mpa로 세팅하여 max(span)으로 보정함

2.5. 측정자료 정도관리 (QA/QC)

- 시료채취 및 분석에 대한 정확성을 평가하기 위하여 실험이 수행 동안 동일한 조건의 시료에 대하여 중복샘플링(duplicate sampling)을 수행함
 - 중복샘플링정밀도(duplicate sampling precision)는 아래 수식을 이용하여 계산하였고, 전체적으로 5% 이하에 우수한 결과로 시료채취가 이루어졌음

$$Duplicate\ Precision\ (\%) = \frac{|A - B|}{(A + B)/2} \times 100$$

- 기기분석정밀도(replicate precision)는 RSD(Relative Standard Deviation)으로 표현하였고, RSD는 아래의 식을 사용하여 계산함
 - 본 연구에서는 2ppm의 톨루엔을 7회 분석한 결과 중복분석 정밀도가 4.5%로 나타남

$$RSD(\%), \text{Relative Standard Deviation} = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100$$

$$\sigma^2 = \text{Variance} = \frac{\sum (X_i - \bar{x})^2}{N - 1}$$

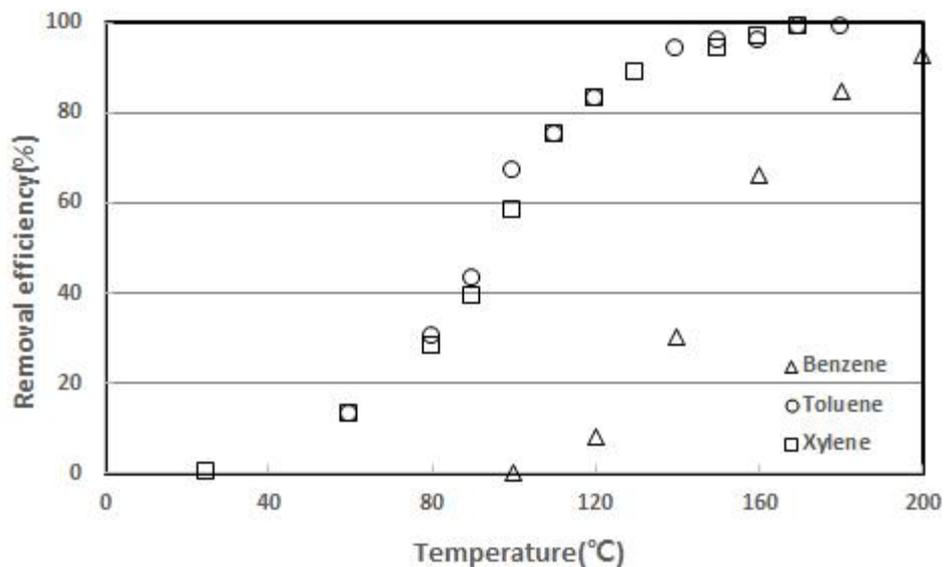
$$\sigma = \text{Standard Deviation}$$

$$\bar{x} = \text{Mean}$$

- 기기검출한계는 대개 3σ 로 정의되는데, 본 연구에서의 GC/FID 검출한계는 1.5ppm (sampling loop size: 500 μ L 기준)으로 나타남

3. 저온촉매 VOC 제거 효율

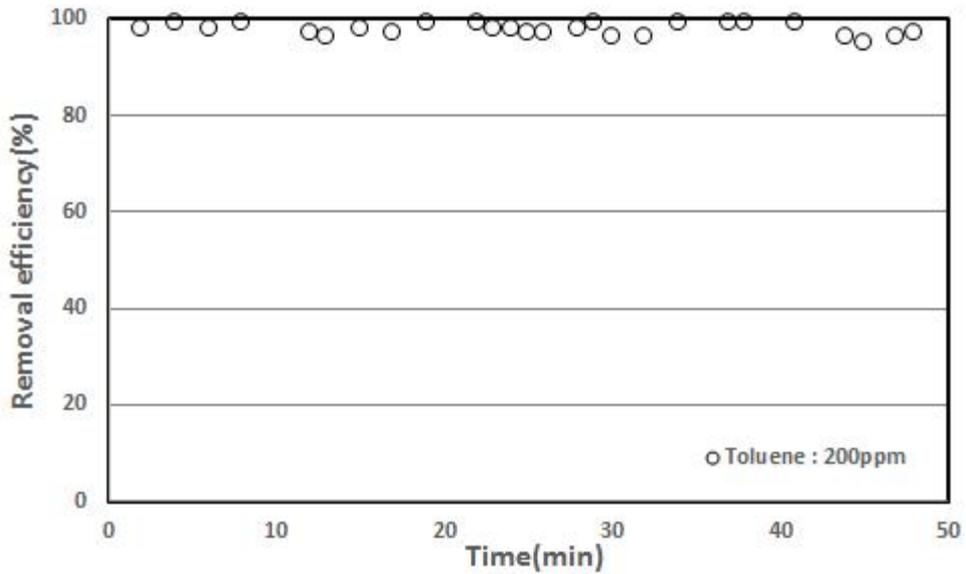
- 소수성제올라이트 탈착 시 배출되는 휘발성 유기화합물의 처리를 위해 저온에서 촉매화성이 일어나는 망간산화물 촉매를 이용하여 최적 운전조건을 찾고자 하였음
- 다음 그림은 GHSV 6000hr⁻¹에서 온도에 따른 VOC별 제거효율을 나타낸 그래프로 톨루엔과 자일렌의 경우 60 $^{\circ}$ C 부근에서 제거효율을 보이다가 140 $^{\circ}$ C에서 90%이상의 효율을 보이고 있음
 - 구조적으로 안정한 벤젠의 경우 120 $^{\circ}$ C 부근에서 제거효율을 보이다가 200 $^{\circ}$ C부터 제거효율 90% 이상을 보임
 - 이는 일반적인 귀금속 촉매의 경우 200 $^{\circ}$ C 부근에서 활성이 일어나고 300 $^{\circ}$ C가 넘어서면서부터 활성화가 되어 350 $^{\circ}$ C정도가 되어야 안정적인 제거효율을 보이는 것으로 알려져 있음



<그림 3.8> BTX 제거효율(GHSV=6.000hr⁻¹)

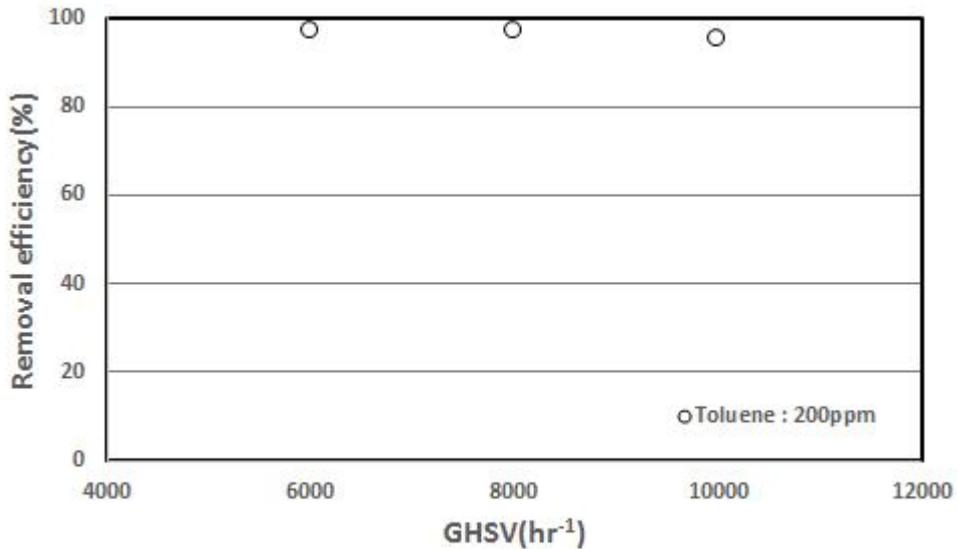
- 다음그림은 GHSV 6000에서 촉매반응기 온도를 200 $^{\circ}$ C로 설정하여 톨루엔

200ppm의 제거효율을 나타낸 것으로 시간이 경과 되더라도 지속적으로 98% 이상의 높은 효율을 보임



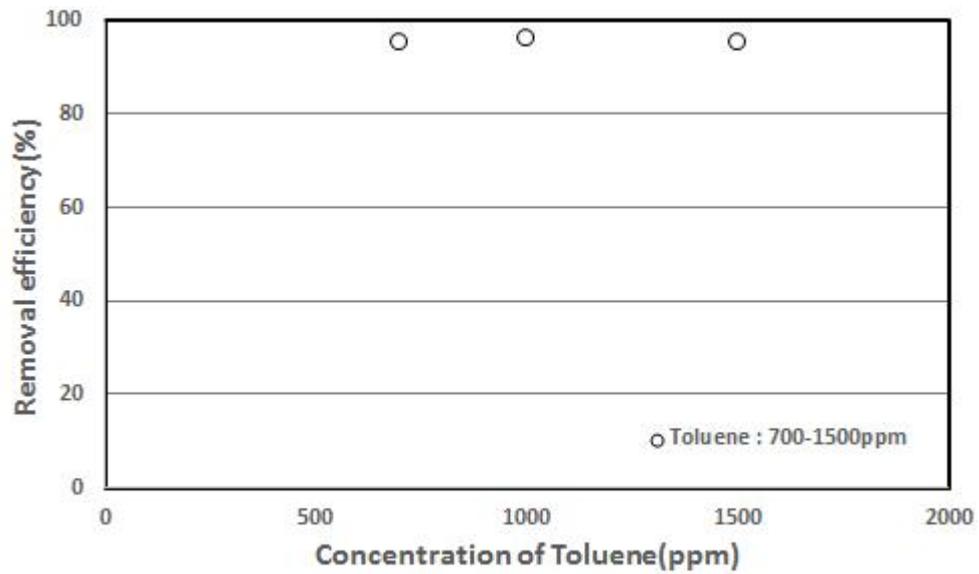
<그림 3.9> 톨루엔 제거효율(200℃, GHSV=6.000hr⁻¹)

- 다음 그림은 촉매반응기 온도 200℃에서 톨루엔 200ppm 조건에서 GHSV를 6,000, 8,000, 10,000으로 증가시키면서 제거효율을 측정하였음
- GHSV가 6,000과 8,000에서는 97% 이상의 효율 보이다가 GHSV가 10,000으로 증가되면서 제거효율이 95%로 감소되는 경향이 나타남



<그림 3.10> 톨루엔 제거효율(200℃, GHSV=6.000hr⁻¹ ~ 10,000hr⁻¹)

- 다음 그림은 촉매반응기 온도 200℃에서 GHSV 10000으로 톨루엔의 농도를 700, 1000, 1500ppm 로 증가시키면서 제거효율을 나타내었음
 - 모든 농도에서 95% 이상의 제거효율을 나타냄
 - 이는 유입농도가 증가하더라도 제거효율은 변화가 없다는 나타냈으며, 유농도의 변화에서도 VOC를 안정적으로 처리할 수 있을 것으로 판단됨



<그림 3.11> 톨루엔 제거효율(200℃, GHSV=10,000hr⁻¹)

제 4장 Pilot Scale Plant 실험결과

-
1. 현장 적용 대상업체 선정
 2. Pilot Scale Plant 설계안
 3. Pilot Scale Plant 현장 실험결과
 4. 개발 기술의 경제성 분석
-

제 4장 Pilot Scale Plant 실험결과

1. 현장 적용 대상업체 선정

1.1 대상업체 선정

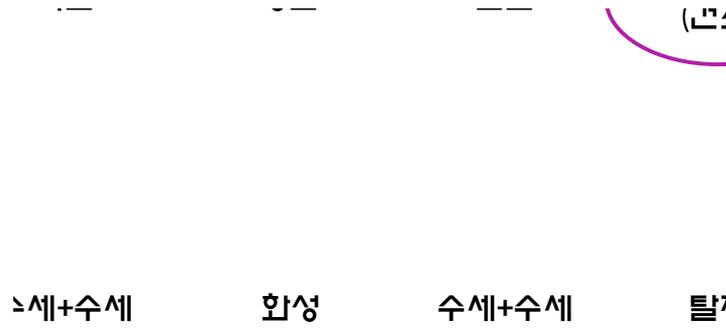
- 시화·반월산단의 VOCs(악취) 발생 업체 중 실용화 사업 대상을 선정하기 위해 본 센터의 기업지원 프로그램을 통해 알게 된 방지시설 교체·보수를 필요로 하는 H 도장 업체를 대상 업체로 선정하였다. 대상업체는 <표 4.1>과 같이 알루미늄샤시를 도장 하는 업체로 악취문제로 안산시에 중점관리되고 있는 업체임

<표 4.1> 현장적용 업체 선정

업종	절단가공 및 표면처리강재 생산업 (도장 공정)
악취배출 공정	도장 공정 (상도, 하도), 건조공정(열처리) 등
주요 대기오염 물질	- 악취성 VOCs (톨루엔, 자일렌, 스타이렌, 에칠벤젠 등) - 건조설비 흠(fume)
방지시설 풍량	500 m ³ /min 활성탄흡착탑
배출시설 및 방지시설 현황	- 기존 방지시설의 노후와 및 낮은 VOCs 처리효율로 신규 방지시설 설치가 요구됨 - 도장 부스에서 발생된 오염물질이 잘 포집되지 않고 있음 - VOCs, 대기오염물질, 악취 배출신고 업체

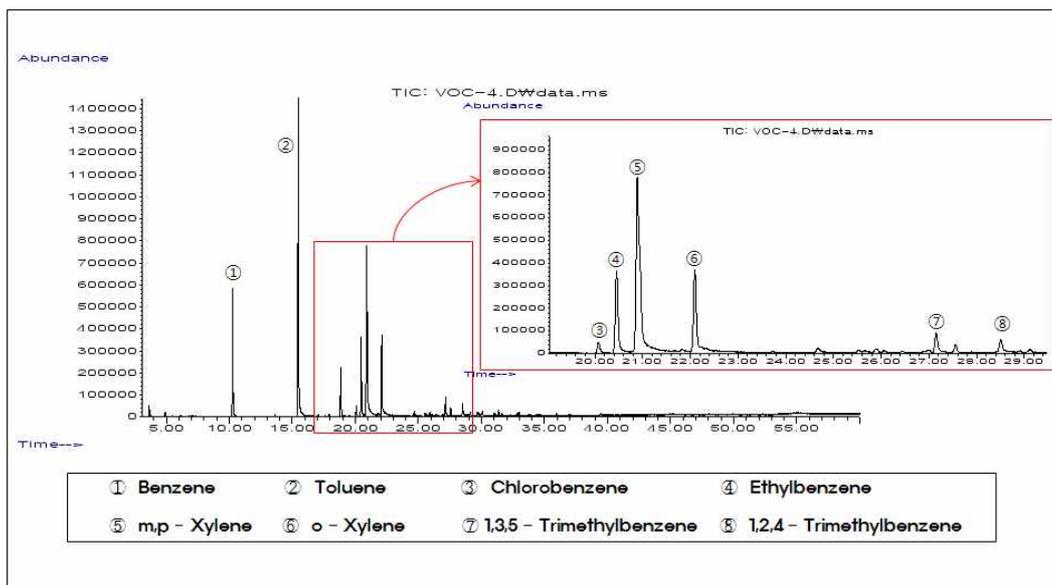
- 아래 그림은 대상업체의 작업공정으로 주요 악취배출원은 도장하는 하도, 상도 도장부스와 이후 건조를 하는 열처리 공정이 주요 악취배출원임. 본 사업의 대상 공정은 상도 공정을 대상으로 Pilot plant 설치하여 테스트 수행하였음

적용대상 공정



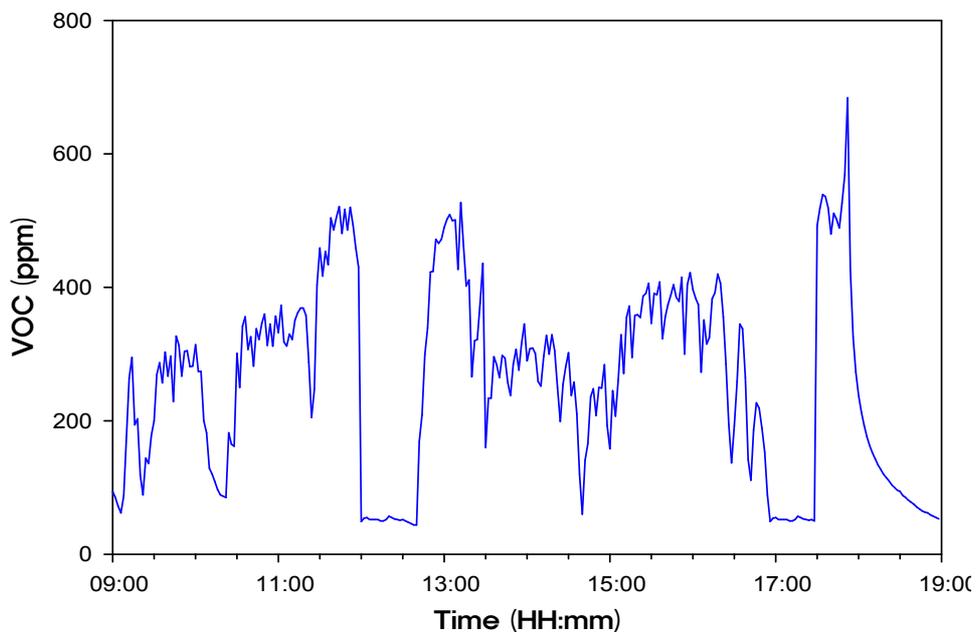
<그림 4.1> 대상업체 제품생산 공정도 및 주요 악취 배출원

- 현장적용 대상공정인 건조공정의 주요 악취물질은 <그림 00>과 같이 벤젠, 톨루엔, 클로로벤젠, 에틸벤젠, 자일렌 등의 악취성 VOCs류 등이 배출되고 있음



<그림 4.2> 건조공정의 주요 악취 원인 물질

- 본 기술을 적용한 업체는 안산시 단원구 성곡동 시화공단에 위치한 J 도장업체로 기존 방지시설의 경우 도장부스에서 배출되는 악취를 처리하는 흡착탑은 거의 역할을 하지 못하고 있었음
- <그림 4.3>은 대상업체의 상도공정 배출구에 THC meter를 설치하여 작업시작부터 작업이 종료되는 시간까지 측정된 결과로 주로 작업시간에만 발생되며, 물질별 농도 현황은 일정한 농도로 지속적으로 배출되기보다는 도장부스스프레이 작업 유무에 따라 물질의 농도 변화가 일어나는 것으로 보인다.



<그림 4.3> 대상업체 건조공정 시간별 악취 배출 특성

<표 4.2> 기존 방지시설에 대한 대상업체의 문제점

문 제 점	현 상
도장부스 배기풍량 부족	<ul style="list-style-type: none"> ■ 부스내부 배기상태 불량으로 부스 내 작업장 오염 ■ 부스에서의 포집 부족으로 건물 내 전체 작업장 오염
건조시설 악취방지시설 (흡착탑) 처리 불량	<ul style="list-style-type: none"> ■ 건조 흠 및 VOC 동시 배출 공정임 ■ 입자상 흠처리가 활성탄 흡착의 흡착효율에 영향을 끼침

- 문제점에 대한 원인은 다음과 같다.
- 도장부스 배기풍량 부족
 - 도장 부스 배기과정에서의 과대한 압력손실 발생 : 정밀점검 필요
 - 흡착탑 내부 카본메트가 배출분진으로 막혀 과대한 압력손실 유발 : 정밀점검 필요
- 악취방지시설인 흡착탑의 처리 불량
 - 도장시설에서 배출되는 용제가 증발한 가스형태의 악취는 활성탄이 포화되어 전혀 제거해 주지 못하기 때문임
 - 즉 아래 그림 4-5와 같이 활성탄이 포화되어 흡착능력을 상실했기 때문임. 그러나 현재 있는 방지시설로 문제를 해결하기 위해 활성탄이 포화될 때마다 교체해 주는 것을 생각해 볼 수 있으나 이는 연간 9천만원의 활성탄 교체비가 소요되기 때문에 현실성이 없음.

1.2 악취 및 먼지 배출 특성 분석

- 현장적용 대상시설의 방지시설 최적설계를 위해서 도장시설의 악취원인이 되는 원료물질의 현황을 업체가 제공하는 MSDS(물질환경보건자료)와 원료 사용량을 이용하여 방지시설에 유입되는 오염물질의 양의 산정하였음
- 산정된 오염물질 양은 도장시설의 국소배기 풍량을 적용하여 예상 배출농도를 산출하여 실 규모 방지시설의 설계자료에 활용하였다. <표 4.3>과 <표 4.4>는 업체에서 제공한 원료 사용물질의 종류 및 사용량에 대한 자료임

<표 4.3> 원료 사용물질의 종류 및 사용량

종류		구성성분	조성 (wt%)	적용 조성 (wt%)	1일사용량 (kg)
페인트 (200L/일)	코푸럭스 톱코우트 (100L/일)	고형분	40-60	50	45
		톨루엔	21-30	27	24
		자일렌	4-13	10	9
		중방향족화합물 용제 나프타	0.1-0.9	0.5	0.4
		프로필렌글리콜모노메틸에테르 아세트산	1-10	6	5
		아세트산 2-메톡시-1-프로필	0.1-0.9	0.5	0.4
		부틸셀로솔브	1-10	6	5
	FROPON (100L/일)	고형분	40-65	50	45
		톨루엔	10-15	12	11
		자일렌	0-10	4	4
		에틸렌글리콜에틸에테르아세테이트	10-20	13	12
		에틸렌글리콜모노부틸에테르	5-15	6	5
		디메틸프탈레이트	5-15	6	5
		3,5,5-트리메틸사이클로헥센온	5-15	6	5
첨가물		3	3		
신너 (108L/일)	DURANAR TOP THINNER (60L/일)	부틸 디 글리콜	17-27	22	12
		중방향족화합물 용제 나프타	43-53	48	26
		크실렌	20-30	25	14
		메틸이소부틸케톤	3-8	5	3
	희석제 0276 (50L/일)	자일렌	34-43	40	19
		에틸벤젠	4-13	10	5
		중방향족화합물 용제 나프타	24-33	30	14
		기타		20	9

<표 4.4> 원료 사용물질의 혼합 후 용제 조성

구성 성분	1일사용량 (kg)	조성 (wt%)	취기한계 (ppm)
톨루엔	24 + 11 = 35	18	0.33
자일렌	9 + 4 + 14 + 19 = 46	24	0.05
중방향족화합물 용제 나프타	0.4 + 26 + 14 = 40	21	
프로필렌글리콜모노메틸에테르 아세트산	5	3	
아세트산 2-메톡시-1-프로필	0.4	0	
부틸셀로솔브	5	3	
틸렌글리콜에틸에테르아세테이트	12	6	0.049
에틸렌글리콜모노부틸에테르	5	3	
디메틸프탈레이트	5	3	
3,5,5-트리메틸사이클로헥센온	5	3	
첨가물	3	2	
부틸 디 글리콜	12	6	
메틸이소부틸케톤	3	2	0.17
에틸벤젠	5	3	0.17
기타	9	5	
합 계	190	100	

1.2.1 원료사용 물질의 종류 및 사용량

가) 먼지 배출량 및 농도 산정

(1) 먼지 배출량

총 도료 사용량 = 약 280kg/일

도장시 미스트 배출량 = 도료사용량 × 0.5 (LOSS율 50% 적용시)
= 140kg/일

하도와 상도 각각 50%씩 배출 된다면

하도 도장시 미스트 배출량 = 140kg/일 × 0.5
= 70kg/일

미스트 중 용제가 증발한 분진 배출량은 32%가 고형분 이므로

하도 도장시 먼지 배출량 = 70kg/일 × 0.32
= 22kg/일

(2) 먼지 배출농도

먼지 배출농도 C = 22kg/일/[500m³/분 × {273/(273 + 25)} × 60 × 10h/일] × 106
= 80 mg/Nm³

나) THC 및 주요 물질 배출량 및 농도

(1) VOC 배출량

총 용제 사용량 = 190kg/일

도장시 VOC 배출량 = 약취배출량 × 0.8(후드포집율) × 0.8(도장시 증발율)
= 190kg/일 × 0.8 × 0.8
= 122kg/일

하도와 상도 각각 50%씩 배출 된다면

상도 도장시 VOC 배출량 = 122kg/일 × 0.5
= 61kg/일

(2) THC 배출농도

설 비 명

배출가스량 (m³/분)

입구 THC 농도 (ppm)

상도 또는 하도 도장시설

245

430 - 450 (실측)

(3) 주요물질 배출농도

$$\begin{aligned} \text{톨루엔 농도 } C &= 35\text{kg/일} / [500\text{m}^3/\text{분} \times \{273/(273 + 25)\} \times 60 \times 10\text{h/일}] \times 106 \\ &= 35\text{kg/일} / (458\text{Nm}^3/\text{분} \times 60 \times 10\text{h/일}) \times 106 \\ &= 127\text{mg/Nm}^3 \times 22.4/92 \\ &= 31\text{ppm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{자일렌 농도 } C &= 46\text{kg/일} / [500\text{m}^3/\text{분} \times \{273/(273 + 25)\} \times 60 \times 10\text{h/일}] \times 106 \\ &= 46\text{kg/일} / (458\text{Nm}^3/\text{분} \times 60 \times 10\text{h/일}) \times 106 \\ &= 167\text{mg/Nm}^3 \times 22.4/106 \\ &= 35\text{ppm} \end{aligned}$$

중방향족화합물 용제 나프타농도

$$\begin{aligned} C &= 40\text{kg/일} / [500\text{m}^3/\text{분} \times \{273/(273 + 25)\} \times 60 \times 10\text{h/일}] \times 106 \\ &= 40\text{kg/일} / (458\text{Nm}^3/\text{분} \times 60 \times 10\text{h/일}) \times 106 \\ &= 145\text{mg/Nm}^3 \times 22.4/138 \\ &= 24\text{ppm} \end{aligned}$$

다) 복합악취 예측

상기 물질 중 배출량도 많고 감지 농도(취기한계농도)가 매우 낮은 물질로는 크실렌이므로 크실렌을 기준으로 복합악취 농도를 예측하면,

$$\text{크실렌 희석배수} = 35 \text{ ppm} / 0.05 \text{ ppm} = 700 \text{ 배}$$

기타 물질에 대한 영향을 고려하면 복합악취농도는 1000배 로 예상됨

2. Pilot Scale Plant 설계안

2.1 설계기준

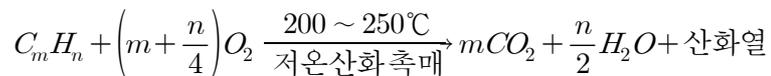
- 최종 분석된 배기유량 1 m³/min에 맞춰 설계된 흡착 plant의 설계기준을 <표 4.5>에 나타냈으며, 설계효율 90%이상과 법적기준치를 만족할 수 있는 설계 기준을 제시하여 제작 설치하였다.

<표 4.5> S 도장 업체에 설치된 흡착 plant의 설계 기준

배기풍량	항목	입구 농도	설계 효율	출구 농도 (설계농도)	법적 기준
				설계	
1 m ³ /분	먼지, mg/S m ³	2,000	99.5%	0.4	200 이하
	THC, ppm	450	93%	30 이하	40 이하
	복합악취, 배	1000	-	300 이하	500 이하

2.3 Pilot plant 설계 및 제작

유입 VOCs는 최고 450 ppm의 배출되며 저온플라즈마에서 입자가 처리된 가스 상 악취(VOCs)는 촉매 산화분해 처리



- 저온촉매 통과속도(GHSV) 선정

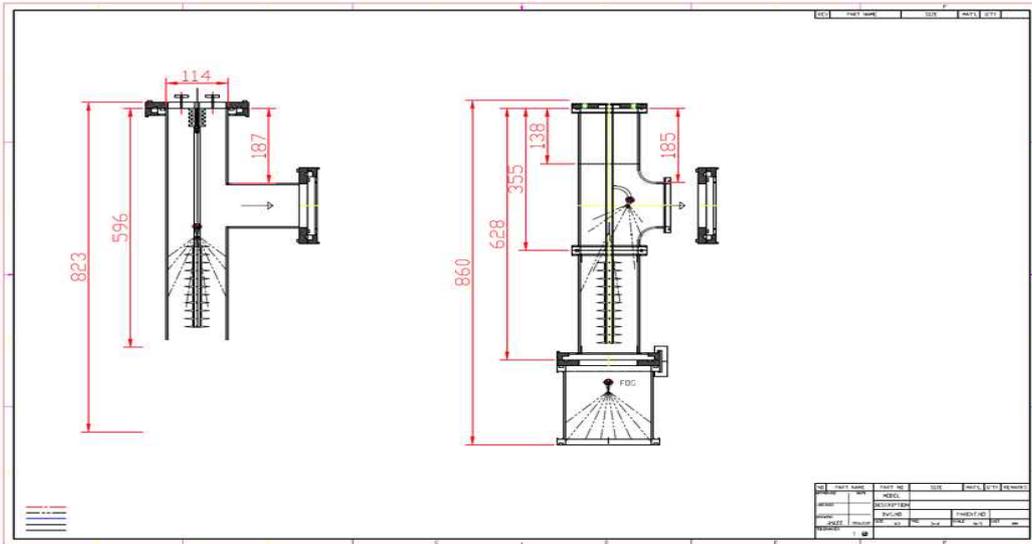
GHSV(Gas Hourly Space Velocity)

$$GHSV = Q_{\text{gas}} / V_{\text{catalyst}}$$

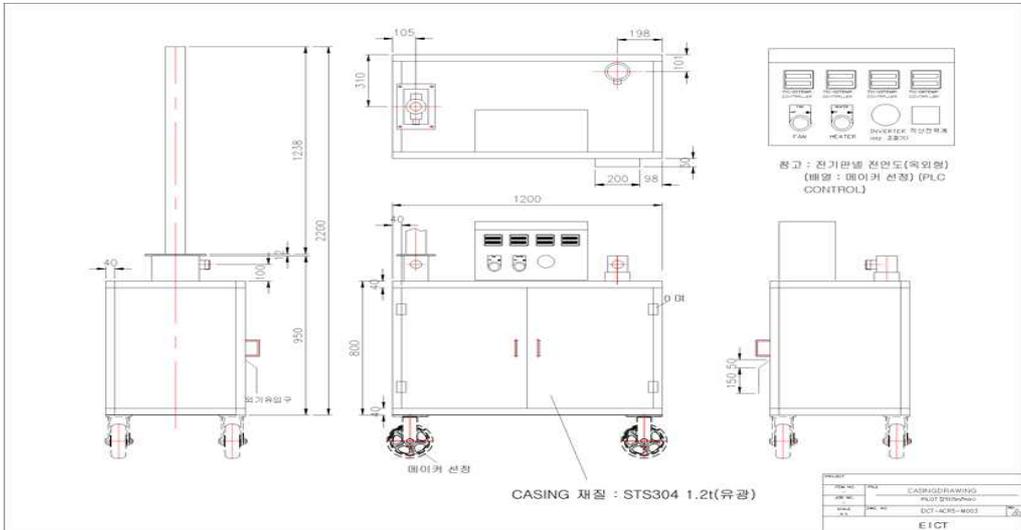
V_{catalyst} : 촉매 충전부피 (m³)

Q_{gas} : 배출가스 유량 (m³/hr)

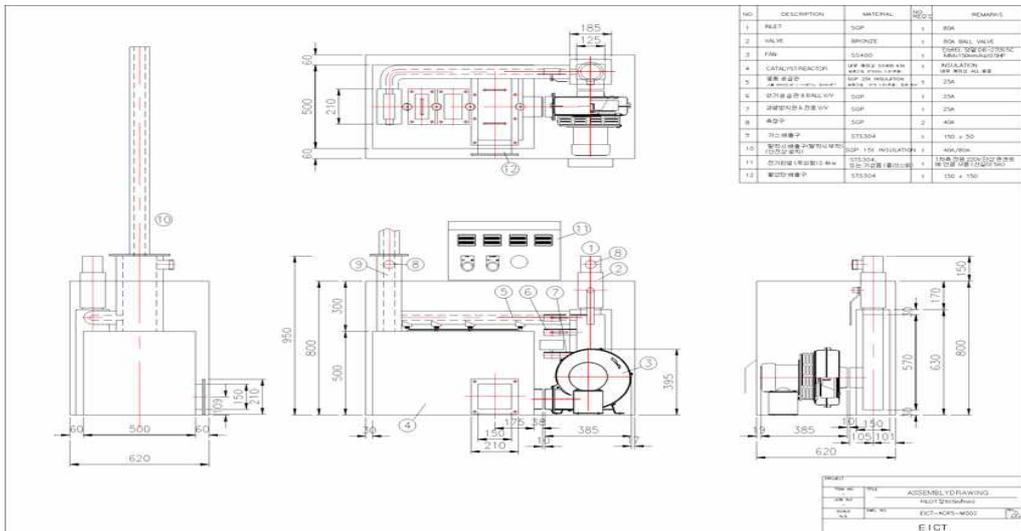
GHSV : 20,000~40,000 /hr



NO.	REV.	DATE	BY	CHKD.	REMARKS
1					



NO.	REV.	DATE	BY	CHKD.	REMARKS
1					



NO.	DESCRIPTION	MATERIAL	QTY	REMARKS
1	플래트	SUP	1	80A
2	배플	BRONZE	1	FAN SHELL WELD 100% 용접 (용접 후 200°C 30분 이상 열처리)
3	필름	SS304	1	INSULATION 100% 용접 후 200°C 30분 이상 열처리
4	CATALYST REACTOR	SS 304 3/8" x 1/2"	1	INSULATION 100% 용접 후 200°C 30분 이상 열처리
5	필름	SUP	1	25A
6	전기용 플러그 8 BALL VV	SUP	1	25A
7	공명기판 4 인출 VV	SUP	1	25A
8	배플	SUP	2	40A
9	배플	SUP	1	150 x 150
10	전기용 플러그 8 BALL VV	SUP	1	400/200A
11	전기용 플러그 8 BALL VV	SUP	1	1000/200A
12	전기용 플러그 8 BALL VV	SUP	1	150 x 150

NO.	REV.	DATE	BY	CHKD.	REMARKS
1					

<그림 4.4> Pilot plant 설계 도면



<그림 4.5> Pilot Plant 제작 및 설치

3. Pilot Scale Plant 현장 실험결과

3.1 현장실험 및 시료분석 방법

- 선정된 사업장을 대상으로 시료채취 및 시료분석 실시
- 중요 고려사항 : 영세사업장 여부, 입자상 물질 및 악취물질 배출농도, 배출가스 유량, 온도 등
- 분석항목 : THC(Total Hydro Carbon: 총탄화수소), 악취물질 성분분석, 복합 악취, 미세먼지 함량 및 입경 분포
- Data 활용 : 입자상 물질 및 악취물질 배출농도 파악, 배출가스 모사장치 개발의 기초자료 활용, Lab scale plant설비 설계 기초자료 활용



(a) 배출가스 채취장치



(b) Lung sampler 시료채취



(c) THC meter(TVA-1000B)



(d) 미세먼지 측정기(InnoAir-615)

<그림 4.6> 시료채취 장비

<표 4.6> 시료분석 항목 분석 방법

분석항목	분석방법	채취지점수	시료채취횟수	시료수	비고
THC	현장 확인	2지점	3회	6	실시간 분석
복합약취		2지점	1회	2	-
미세먼지	대기오염공정시험기 준 및 연속식 측정	2지점	1회	6	실시간 분석

3.2 현장실험 결과

3.2.1 미세먼지 직독식

- 유입 및 공정 처리 후 미세먼지 농도
 - 미세먼지는 중량농도 및 수농도를 측정하였음
 - 중량농도는 PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ 등 세종류로 나누어 측정함
 - 수농도는 0.3, 0.5, 1, 2.5, 10 등 5개 크기로 구분하여 측정하였음
- 미세먼지 중량농도
 - 미세먼지 중량농도는 PM₁₀의 농도가 가장 높게 나타났으며, 평균이 2,721 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로써 일반 대기 기준보다 수십배 높은 결과를 나타내었음
 - 처리후 농도는 기준치 이하로 깨끗한 농도의 공기가 배출되어, 처리효율이 높은 것으로 파악되었음
- 미세먼지 수농도
 - 미세먼지 수의 분포는 가장 작은 크기인 0.3 μm 가 가장 많았으며, 미세먼지의 크기가 증가할수록 그 수가 감소하는 경향을 나타냄

<표 4.7> 유입 미세먼지 농도

구분	유입농도	
	평균	표준편차
PM ₁ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	75.5	2.9
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,409.0	376.6
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,721.2	1,208.9
PM _{0.3} (#/m ³)	2,013,834.2	213,320.4
PM _{0.5} (#/m ³)	1,992,532.6	241,025.9
PM ₁ (#/m ³)	1,625,215.5	334,574.4
PM _{2.5} (#/m ³)	9,099.2	4,824.4
PM ₁₀ (#/m ³)	342.3	712.4

○ PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도 비율

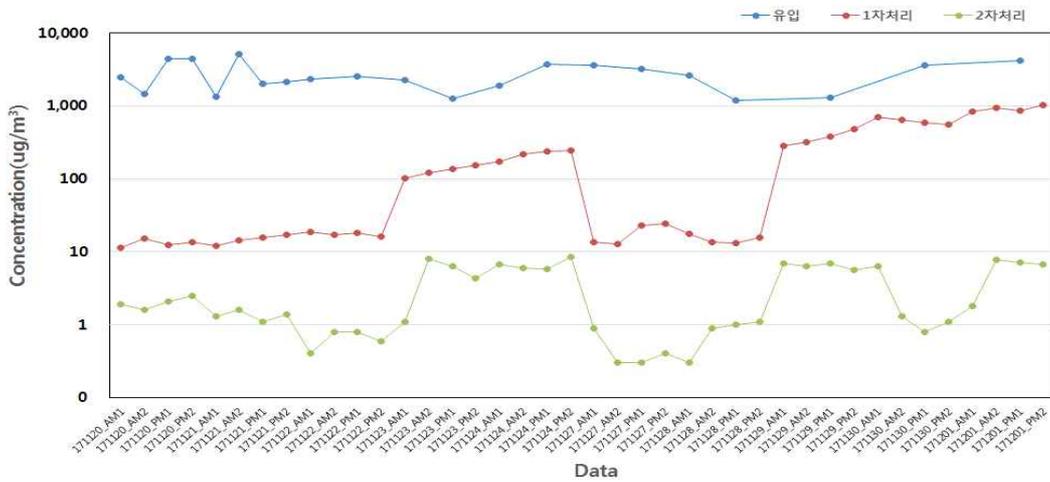
- PM_{2.5}의 PM₁₀에 대한 중량농도 비율은 88.5%로 일반 대기 중 비율(70-80%) 보다 높게 나타나 공정 중 발생하는 미세먼지 중 PM_{2.5}의 비율을 높음을 확인할 수 있었음

<표 4.8> PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도 비율(%)

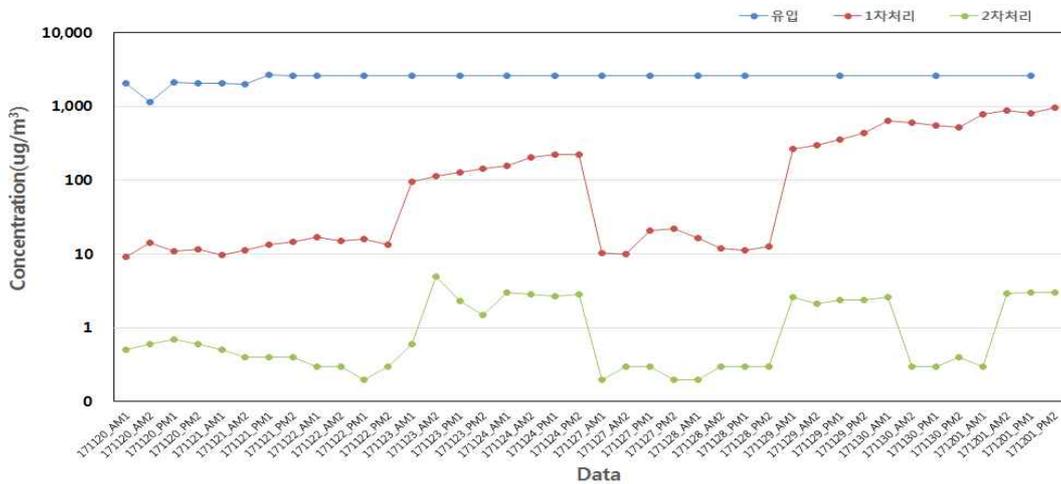
PM _{2.5} (μg/m ³)	PM ₁₀ (μg/m ³)	Ratio(%)
2,409	2,721	88.5

○ 유입 및 1,2차 처리 후 미세먼지 농도분포

- 미세먼지의 분포는 유입구, 1차 플라즈마 처리 후단 및 2차 촉매처리 후단에서 측정하였음
- PM_{2.5}와 PM₁₀모두 처리 후 효율이 좋게 나타났으나 2~3일이 지나면서 1차 플라즈마 장비에서 농도가 높게 나타나 장비 내부의 세정이 필요한 것으로 파악되었음
- 세정 후 제거효율은 다시 향상 되었으나 2~3일이 지나면 다시 효율이 떨어져 정기적인 세정이 필요할 것으로 판단되었음
- 이러한 세정주기를 추 후 파악하여야 실증설비를 설치하는데 있어서 최적의 조건을 도출할 수 있을 것으로 사료됨



(a) PM₁₀



(b) PM_{2.5}

<그림 4.7> 유입 및 1,2차 처리 후 미세먼지 농도 추이

○ 미세먼지 제거효율

- 본 연구 시 가정된 플라즈마의 제거 효율은 주요 미세먼지인 PM_{2.5}와 PM₁₀에서 95% 정도를 나타내어 실험 설계 단계 시 예상하였던 제거 효율보다 높은 제거효율을 나타냄
- 플라즈마에서 제거된 후 유입되는 저온 촉매 반응기에서의 제거 효율도 높아 전체 장비의 효율은 모두 99% 이상으로 나타나 미세먼지 제거효율은 상당히 높은 것으로 나타나 미세먼지 제거에 있어 본 시설들이 성공적임을 확인할 수 있었음

<표 4.9> PM_{2.5} 및 PM₁₀ 제거 효율

구분	미세먼지 유입	플라즈마 처리	촉매처리	플라즈마 제거효율 (%)	촉매 제거효율 (%)	전체 효율 (%)
PM ₁ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	278.6	76.7	0.6	72.5	99.2	99.8
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,409	118	0.9	95.1	99.2	99.9
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,721	128	2.5	95.3	98.1	99.9
PM _{0.3} ($\#/ \text{m}^3$)	2,013,834	637,649	9,073	68.3	98.6	99.5
PM _{0.5} ($\#/ \text{m}^3$)	1,992,533	265,844	1,122	86.7	99.6	99.9
PM ₁ ($\#/ \text{m}^3$)	1,625,216	13,593	149	99.2	98.9	99.9
PM _{2.5} ($\#/ \text{m}^3$)	9,099	19.4	8.5	99.58	56.2	99.9
PM ₁₀ ($\#/ \text{m}^3$)	342	0.2	0.1	99.9	50.0	99.9

3.2.2 미세먼지 중량법

○ 필터에 의한 PM₁₀의 중량 측정방법

- 필터에 의해 분석된 PM₁₀의 제거효율은 전체효율이 99.1%로 직독식에 의해 측정된 99.9%보다 낮은 효율을 나타냄
- 1단에서 제거되는 플라즈마의 제거효율 및 2단에서 제거되는 촉매의 제거효율 모두 중량법의 제거효율이 직독식보다 낮은 값을 나타내었음
- 중량 측정방법에 의한 제거효율은 앞서 설명한 바와같이 99.1%로 나타나 당초 예상했던 제거효율(99%)을 만족하는 결과를 보임
- 중량법에 의한 PM₁₀의 측정은 시료채취 1회가 끝나면 세정 스프레이가 작동하여 세정 후 다시 측정을 실시하는 방법으로 시료채취가 이루어져 PM₁₀ 등 미세먼지의 재비산 등의 방해요소를 제거하였음

<표 4.10> 중량법 측정에 의한 PM₁₀ 제거 효율

(단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	유입	플라즈마 처리 후단	촉매처리 후단	플라즈마 제거효율 (%)	촉매 제거효율 (%)	전체 효율 (%)
평균	2,066.4	227.1	19.3	89.0	91.5	99.1
1차 측정	2,053.6	243.5	21.5	88.1	91.2	99.0
2차 측정	2,178.4	233.6	19.9	89.3	91.5	99.1
3차 측정	1,967.2	204.2	16.5	89.6	91.9	99.2

3.2.3 THC

○ THC 제거 효율

- 플라즈마 처리 시 제거 효율은 10% 이하로 나타나 문헌상의 15% 이하와 크게 다르지 않음을 확인할 수 있었음
- 플라즈마 제거효율과 촉매 제거효율을 합한 최종 제거 효율은 88.7%로 나타나 처리 후 배출되는 THC 농도가 양호하였음

<표 4.11> THC 제거효율

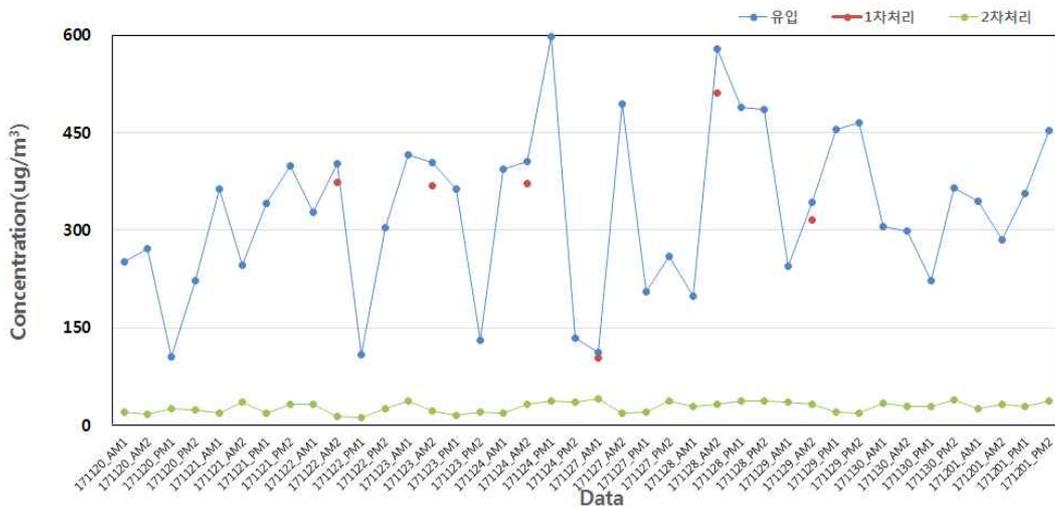
(단위 : ppm)

구분	유입	플라즈마 처리	촉매처리	플라즈마 제거효율 (%)	촉매 제거효율 (%)	전체 효율 (%)
THC	375	341	28.8	8.7	87.7	88.7

※ 시료갯수 : 40개, 농도 : 평균농도

○ 유입 및 1,2차 처리 후 THC 농도분포

- THC의 경우 플라즈마 처리는 잘 되지 않는다는 문헌조사가 있어 유입과 최종 제거 효율을 주로 확인하였음
- THC의 유입 농도는 상당히 분포범위가 크게 나타났으나, 처리 후 유출되는 농도는 일정하게 나타나 촉매 제거장치의 효율이 일정함을 확인할 수 있었음



<그림 4.8> 유입 및 1,2차 처리 후 THC 분포

3.2.4 공기희석배수(악취) 제거효율

- 공기희석배수에 의한 악취의 제거효율은 평균 94%로 악취의 제거가 잘 이루어짐을 확인할 수 있었음

<표 4.12> 악취(공기희석배수) 제거효율

(단위 : 배)

구분	IN	OUT	제거 효율(%)
171122_AM2	1,442	100	93.1
171123_AM2	1,442	100	93.1
171124_AM2	1,442	100	93.1
171127_AM1	669	30	95.5
171128_AM2	2,080	144	93.1
171129_AM2	1,000	30	97.0



<그림 4.9> 시료채취 현장 사진

4. 개발 기술의 경제성 분석

- <표 4.13>은 활성탄 흡착탑, 연소방식에 따른 TO, CO, RTO, 생물학적처리 방식, 자체재생방식의 악취방지시설을 300 m³/min, 150 ppm 처리기준으로 하였을 때의 설비비, 연간운전비 등을 비교하여 나타냄.
- 앞서 설명한 것과 같이 흡착제 자체 재생식의 경우 설비비는 활성탄 흡착탑에 비해 비싸게 소요 되지만 연간 운전비가 저렴한 것으로 판단됨.

<표 4.13> 주요 악취방지시설의 경제성 및 효율 현황

처리 방식	처리 효율	설비비	연간운전비	주요문제점	일반적인 적용기준(C6 환산농도)	
활성탄 흡착탑	85% 이상	3630만원	활성탄비 : 6800만원	<ul style="list-style-type: none"> 과대한 활성탄비 	<ul style="list-style-type: none"> 50 ppm이하의 저농도 이 경우 활성탄 교체주기 : 약 2개월 	
연소 방식	직접연소 (TO)	95% 이상	2억2830만원	LNG : 2억원 (열회수 70%기준)	<ul style="list-style-type: none"> 낮은 농도시 과대한 연료비 	<ul style="list-style-type: none"> 2000-5000ppm 초고농도 [3000ppm인 경우 연료비 700만원]
	촉매연소 (CO)	95% 이상	2억5000만원	LNG : 6000만원 (열회수 70%기준) 촉매비 : 2000만원(교체주기 5년)	<ul style="list-style-type: none"> 낮은 농도시 과대한 연료비 	<ul style="list-style-type: none"> 1000-2000ppm 고농도 [1500ppm인 경우 연료비 500만원]
	RTO	95% 이상	3억5000만원	LNG : 1000만원 (열회수 95%기준)	<ul style="list-style-type: none"> 시설비 고가 	<ul style="list-style-type: none"> 10-1000 ppm의 중농도 [500ppm인 경우 연료비 200만원]
생물학적처리 방식	?	약 2억원	미생물영양제 등 : 300만원 폐수처리비 : 2000만원	<ul style="list-style-type: none"> 일부 VOC(특히 불용성) 낮은 효율 폐수 발생 	<ul style="list-style-type: none"> 50-300 ppm의 중농도 	
저온촉매 LTCO	90% 이상	20,000만원	LNG : 1000만원 (열회수: 70%기준) 촉매비 : 2000만원(교체주기 5년)	<ul style="list-style-type: none"> 촉매독이 존재할 경우 적합하지 않음 	<ul style="list-style-type: none"> 1000-2000ppm 고농도 [1500ppm인 경우 연료비 500만원] 	

※ 설계조건 : 300 m³/min, 150 ppm

○ <표 4.14>는 처리방식에 따른 경제성을 비교하기 위해 아래 식을 이용하여 평가하고 비교하여 나타내었다.

총 투자비용 = I(초기투자비용) + S(소요비용의 현재가치화)

$$S = D \times \frac{(1+r)^{n+1}}{(1+r)^n}$$

여기서 D : 연간 소요되는 유지관리비용

r : 이자율(보통 10%적용)

n : 방지시설의 내구연한(10년)

○ 총투자비를 비교해 보면 흡착제 자체재생방식이 기존 활성탄 흡착탑에 비해 12배 정도 총투자비가 저렴할 것으로 판단되어, 효과적인 악취성 VOCs를 처리하기 위한 경제적인 기술이라고 생각된다.

<표 4.14> 비용 및 경제성 평가 결과

처리방식	설치비 (백만원)	유지비 (백만원)	내구연한 (백만원)	소요비용 현재가치화 (백만원)	총투자비 (백만원)
활성탄 흡착탑	36.3	68	10	618	654
직접연소 (TO)	228.3	200	10	1818	2046
촉매연소 (CO)	250	64	10	582	832
RTO	350	10	10	91	441
생물학적처리방식	200	23	10	209	409
저온촉매	200	10	10	91	291
저온플라즈마	250	21.6	10	196	446

4.1 개발 기술의 적용가능 업체 현황

- 안산·시흥 스마트허브 대상 개발 기술이 적용 가능한 업체의 현황을 <표 4.15>에 나타내었음. 2013년 전수조사 자료에 의하면 대기배출 업체 중에 599개가 적용 가능 할 것으로 판단됨
- 업종으로는 도장업, 출판 및 인쇄업, 조립금속제품 제조업 등이 상당수 적용 가능할 것으로 보임. <그림 4.10>은 반월·시화산업단지에 적용가능 업체의 분포를 나타내고 있음.

<표 4.15> 저온플라즈마 & 저온촉매 적용 가능한 업체 현황

업 종 명	적용가능 업체 수
- 페인트 제조업종	21
- 도장업종(금속, 알루미늄, 목재 등)	106
- 화합물 및 화학제품 제조업	51
- 자동차부품 제조	70
- 조립금속제품 제조업	110
- 잉크제조업종	17
- 출판 및 인쇄업종 등	160
- 전자부품 업종	18
- 고무 및 플라스틱 제조업	46
합계	599

※ 출처 : 2013년 반월·시화산업단지 대기배출업체 전수자료 참고



<그림 4.10> 개발기술 적용 가능업체 위치(안산·시흥 스마트허브)

제 5장 결론 및 기대효과

-
1. 결론
 2. 기대효과
-

제 5장 결론 및 기대효과

1. 결론

- 미세입자 처리가 가능하며 구조가 단순한 저온플라즈마 기술 개발 및 현재 해외에 적용중인 신기술 및 관련 자료를 조사하여 국내 자료와 비교 및 기술개발에 반영
- 설비의 독립운전 및 병합, 처리물질의 농도 조건 등에 따른 설비 운전조건 도출 저온 촉매 반응기의 최적 GHSV, 온도 설계 조건 도출 기존 촉매에 대비 100도 이하 운전으로 운영비용 및 온실가스 저감
- 미세먼지 & 악취 독립 및 동시 처리가 가능한 모듈형 및 병합형 기술로 흡 및 미세먼지 발생 배출원의 입자상 물질 처리모듈 개발과 악취 및 VOC 발생 배출원의 가스상 물질 처리모듈 개발로 미세먼지 및 악취 동시 처리 융합형 처리기술 개발
- 기존 활성탄흡착탑에 비해 악취제거 효율이 높고 설치비 및 유지관리비를 합한 방지시설 총투자비용이 2.2배 정도 저렴하여 장기적인 악취배출시설 관리에 효과적일 것으로 판단됨
- 기존 방지시설의 유지관리 문제점을 해결하기 위해 지속적으로 방지시설을 관리할 수 있는 악취관리시스템 구축하여 악취방지시설의 효과적인 관리할 수 있을 것으로 판단됨
- 대기 중으로 또는 폐기물로 버려졌던 배출원의 오염물질(악취)들이 본 흡착제자체 재생식 산화기술로 폐기물의 에너지화 기술 구현 및 실용화 기반 마련하여 현 정부 정책인 저탄소 녹색성장에 적합한 미래형 방지시설이라 생각됨
- 본 저온플라즈마 및 저온촉매 기술이 기존 활성탄 흡착탑의 유지관리 문제점을 해결하여 경기도의 환경문제가 빈번히 제기되고 있는 안산·시흥스마트 허브 악취 저감에 크게 기여할 것임
- 저비용 고효율에 방지시설을 적용하여 대부분이 영세업체인 반월시화산업단지 악취배출업체의 악취 및 대기오염물질 처리에 대한 애로사항을 해결할 수 있을 것으로 판단됨
- 오염물질(악취)의 에너지화로 오염물질 처리와 에너지 회수로 악취배출업체

의 운영비 절감을 통해 생산비용의 감소되어 기업의 생산 활동에 기여할 것임

2. 기대 효과

- 기존 방지시설의 유지관리 문제점을 해결하기 위해 지속적으로 방지시설을 관리할 수 있는 악취관리시스템 구축하여 악취방지시설의 효과적인 관리할 수 있을 것으로 판단됨
- 저에너지 및 저탄소형 실용화 기반 마련하여 온실가스 감축에 기여할 수 있는 미래형 방지시설 개발기술 기반 구축
- 본 흡착제 자체 재생식 산화장치가 기존 활성탄 흡착탑의 유지관리 문제점을 해결하여 경기도의 환경문제가 빈번히 제기되고 있는 반월시화산업단지 악취 저감에 크게 기여할 것임
- 저비용 고효율에 방지시설을 적용하여 대부분이 영세업체인 반월시화산업단지의 악취배출업체의 악취 및 대기오염물질 처리에 대한 애로사항을 해결할 수 있을 것으로 판단됨
- 악취저감으로 인한 지역주민의 민원 해소 및 환경개선
- 영세 및 임대 업체가 대부분인 안산·시흥 스마트허브 업체들의 환경관리 및 규제에 대한 부담 감소
- 안산·시흥 스마트허브에 밀집되어 있는 중소기업체에서 배출되는 악취 물질을 제거시키는 데 직접 활용할 수가 있고, 그 밖의 입자상 및 악취 동시 배출되는 가구 공장이 밀집되어 있는 지역이나 출판사, 인쇄소, 자동차 정비소 등의 도장 시설에서 발생하는 휘발성 유기 물질을 효과적으로 제거하는 데 활용할 수가 있음.
- 본 연구에서 개발하는 입자상 및 악취 동시저감 기술은 다양한 규모로 제작할 수가 있게 하고 설치 비용과 운영 비용이 저렴하도록 하는 데 중점을 두고 있음. 그러므로 안산·시흥 스마트허브의 영세한 기업체에서 발생되고 있는 악취 물질을 저감시키는 데 크게 기여할 것으로 전망됨
- 본 실용화 기술의 국제환경기술전(ENVEX)과 같은 환경기술전 등의 참여를 통해 적극적인 기술 홍보로 전국적인 기술확산으로 우리나라 악취 및 VOCs 처리에 기여할 것임.

참 고 문 헌

참 고 문 헌

- 광촉매와 적외선을 이용한 악취 저감, 전태영 등, 2014.
- 입자 시뮬레이션을 이용한 저온 플라즈마 장치에서의 운동학에 관한 연구, 장현우, 포항공대 박사학위논문, 2013.
- 저온 플라즈마를 이용한 유해가스 처리기술 개발, 한국기계연구원, 2001.
- 저온 플라즈마를 이용한 유해 VOCs 분해 연구, 박미정, 경희대 석사학위논문, 2015.
- 저온 플라즈마를 이용한 톨루엔, 프로판 및 에틸렌 제거에 관한 실험적 연구, 서동범, 단국대 석사학위논문, 1999.
- 저온 플라즈마와 촉매를 이용한 톨루엔 및 부틸 에세테이트의 제거 특성에 관한 연구, 문승일, 인하대 박사학위논문, 2003.
- 플라즈마를 결합한 바이오 트리클링 시스템에 의한 휘발성 유기물질의 제거, 김학준 등, 2007.
- 촉매 플라즈마 기술을 적용한 하이브리드형 음식점 및 하수구 악취 처리 장치 개발, 봉춘근 등, 2011.
- 휘발성유기화합물(VOCs) 제거를 위한 저온금속촉매 실용화에 관한 연구, 정성철 등, 2012.
- 실시간 악취모니터링 시스템을 위한 가스센서의 활용 연구, 허현승, 김선태, 홍성주, 회일환. 한국대기환경학회 환경공동학술대회, 2007.
- 경인지방환경관리청, 배출시설 설치허가신청서 작성사례집, 경인지방환경관리청, 2001
- 소규모 영세 사업장 악취 관리방안 수립연구, 국립환경연구원, 2004.
- 악취측정 및 제거, 김기은, 이해경, 아카데미서적, 2004.
- 대기오염방지공학, 동화기술, 김동술, 김태오, 2004.
- 대기오염방지시설 설계실무편람, 대구지방환경관리청, (주)동양탄소 기술자료, 1999.
- 대기오염제어, 이상권, 김신도 외8명, 동화기술, 2006.
- 흡착공학과 과학, 임굉, 두양사, 2004.
- 제올라이트의 특성과 응용기술, 임재석, 임굉, 내하출판사, 2006.
- 악취오염개론, 최성우, 안상영, 동화기술, 2005.

화학공학편람편찬위원회, 화학공학편람, 집문사, 1995.

악취배출시설 관리 업무 편람, 환경부, 1999.

취발성 유기화합물질 방지시설 설계지침, 환경부, 2000.

업종·시설별 악취관리, 환경부, 2003.

자동차 정비 도장시설 VOC 적정관리방안 연구 및 환경관리지침 개발, 환경부, 2004.

대기오염물질 및 악취배출 사업장 오염물질 관리방안 마련, 환경부, 2006.

INDUSTRIAL VETILATION (A Manual of Recommended Practice) (25th Edition),
Signature Publishers, ACGIH, 2004.

Air Pollution Engineering Manual (Second Edition), Davis. W.T, JOHN WILEY &
SONS, 2000.

Modeling Effects of Moisture on Adsorption Capacity of Activated Carbon for
VOCs, Chou, M.L, Journal of environmental engineering, 128(5),
437-443, 1997.

Air pollution control : a design approach, C. David, Cooper, Waveland Press,
2002.

Hydrophobic Zeolites for VOC Abatement, Lars Fäith, Munters Zeol, 1987

Robert Jennings, Sources and control of air pollution, Heinsohn, Prentice Hall,
1999

Air Pollution Engineering Manual, John A. Danielson, US EPA, 1973

Handbook of environmental engineering calculations, Lee, C. C, McGraw-Hill,
2000

Perry's chemical engineers' handbook, Perry, Robert H., McGraw-Hill, 1999

ODOR AND VOC CONTROL HANDBOOK, Rafson. H, McGraw-Hill, 1998.

Adsorbents fundamentals and applications, Ralph T. Yang, Wiley-Interscience,
2003

Handbook of chemical and environmental engineering calculations, Reynolds,
Joseph P, Wiley, 2002

Air pollution control equipment selection guide, Schifftner, Kenneth C, CRC
Press, 2002

Separation process principles, Seader, J. D, Wiley, 1998

Biotechnology for Odor and Air Pollution Control, Shareefdeen. D.Z, Springer, 2005.

Odours in Wastewater Treatment (Measurement, Modelling and Control), Stuetz. R, 2003.

VOC Emissions from WasteWater Treatment, Tata.P, Witherspoon.J, Lue-Hing.C, 2001.

Engineering and Design ADSORPTION DESIGN GUIDE, U.S.Army, 2001.

ENGINEERING AND DESIGN AIR STRIPPING, U.S Army, 2001.

Air Pollution Engineering Manual, Air & Waste Management, Wayne T. Davis, 2000.

주 의 문

최종연구보고서 (17-08-04-40-43)

저온촉매를 이용한 미세먼지 및 악취 동시 배출업종에 적합한 저탄소
하이브리드형 처리기술 개발

발행인 : 센터장 김 문 일

발행일 : 2018년 1월 17일

발행처 : 안산녹색환경지원센터

주 소 : 경기 안산시 상록구 한양대학로 55 한양대학교 제2공학관 513호

전 화 : 031-400-4236, 436-8141~5

팩 스 : 031-400-4237

e-mail : agec@agec.or.kr

※ 주 의

1. 이 보고서는 안산녹색환경지원센터에서 시행한 연구개발사업의
보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시
안산녹색환경지원센터에서 시행한 연구개발사업의 연구결과임을
밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는
공개하여서는 아니됩니다.