

VOCs 방지기술현황 및 적용사례(6)



한희진 / 한국환경정책·평가연구원 연구위원

목 차

I. 서론

II. VOCs 방지기술 현황

1. VOCs 방지기술의 개요
2. 연소기술
3. 흡착·농축 기술
4. 흡수·응축 기술
5. 생물학적 처리 기술
6. 기타 최신기술

III. VOCs 방지기술의 적용사례

1. FTO를 이용한 황합유 VOCs 처리사례
2. 비열 플라즈마 기술을 이용한 VOCs 와 NOx 처리사례
3. 2단 재생 열산화 기술을 이용한 VOCs 배출처리 사례
4. 탄소 및 지올라이트 흡착제를 이용한 산업공정 배기가스로부터의 VOCs 제거사례
5. 미국의 합성유기화합물 제조공장 적용사례

IV. 결론



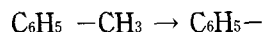
6.3 고에너지 코로나 방전법 (HIGH ENERGY CORONA DISCHARGE)

6.3.1. 운영원리

고에너지 코로나 방전법은 전기방전 반응기에 사용되며 자유기(free radical)를 생성하는 기수로 자유기 산화는 중성의 기체분자로부터 전자를 이탈시켜 양이온으로 변화시키기 위해 전기장을 형성하는 것과 깊은 관련이 있다.

전자의 방출은 강한 전기장이 기체 내에 형성되어 기체분자를 이온화시키고 저온 플라즈마를 형성함으로써 이루어지며 강한 전기장은 중성의 기체분자로부터 전자를 이탈시켜 양이온으로 만들어 전류를 흐르게 한다. 부분 방출에 필요한 전압은 기체의 압력과 조성, 그리고 전기장 기하구조(field geometry)에 일차적으로 의존한다.

이탈된 전자는 화학반응의 촉매로 작용하며 특히 산소 존재하에서 산화반응이 일어나고 화합물은 분자량이 보다 작은 화합물로 분해된다. 일례로 톨루엔의 분해기작(mechanism)은 다음과 같다.



생성된 벤젠기는 산소와 반응하여 CO와 CO₂를 형성한다.

전자의 방출은 강한 전기장이 기체내에 형성되어 기체분자를 이온화시키고 저온 플라즈마를 형성함으로써 이루어지며 강한 전기장은 중성의 기체분자로부터 전자를 이탈시켜 양이온으로 만들어 전류를 흐르게 한다. 부분 방출에 필요한 전압은 기체의 압력과 조성, 그리고 전기장 기하구조(field geometry)에 일차적으로 의존한다.

고에너지 코로나 방전공정을 이용한 TCE제거기작에 따르면 반응결과로 포스겐(COCl_2)과 HCl 이 생성되거나 생성된 포스겐은 물과 반응하여 CO_2 와 HCl 을 형성하므로 gas stream에 수증기를 주입하면 포스겐 중간생성물을 없앨 수 있다. 더욱이 bench-scale 시험에 따르면 코로나 방전공정에서는 측정되지 않을만큼 적은 양의 포스겐이 형성된다.

코로나 방전은 얇은 선, 바늘 또는 튕니 모양의 물질로 이루어진 금속 전극 주위에 플라즈마를 형성하기 위하여 직류, 교류 또는 저주파 펄스를 이용한다. <그림 II-14>는 고에너지 코로나 방전장치를 나타낸 것이다.

6.3.2. 고에너지 코로나 방전법의 장·단점

고에너지 코로나 방전법은 탄소흡착법이나 증기 재생과는 달리 저농도의 VOCs도 효과적으로 제어할 수 있는 이상적인 VOCs처리법으로 전기

만을 연료로 사용한다. 고농도의 VOCs 처리에도 효과적이며 상온에서 작동되어 배가스를 예열하기 위한 장치가 필요 없다는 장점이 있다. 반면 배가스의 일부만이 전극 부근의 고온 플라즈마와 접촉하기 때문에 오염물질의 완전제거가 불가능하고 용매를 재이용할 수 없으며 생성되는 플라즈마의 에너지가 낮기 때문에(보통 20 eV 미만) 규모확대의 문제가 발생할 수 있다.

또한 대규모의 경제적인 공정이 되기 위해서는 전자에너지가 유기물의 결합을 깨뜨리는데 필요한 이론적인 에너지의 최소 수배~수십배는 되어야 한다. 예를 들면 톨루엔의 C-H 결합을 깨뜨리기 위해서는 최소 4.3eV의 에너지가 필요하므로 대규모의 효과적 처리를 위해서는 20eV 이상의 에너지가 필요하다.

막 분리법이나 소각 등의 다른 공정과 비교해 볼 때 코로나 공정의 특징은 자본비가 저렴하고 운영비의 대

부분은 시스템을 작동하기 위한 연료비가 차지한다는 것이다.

6.3.3. 적용가능 분야

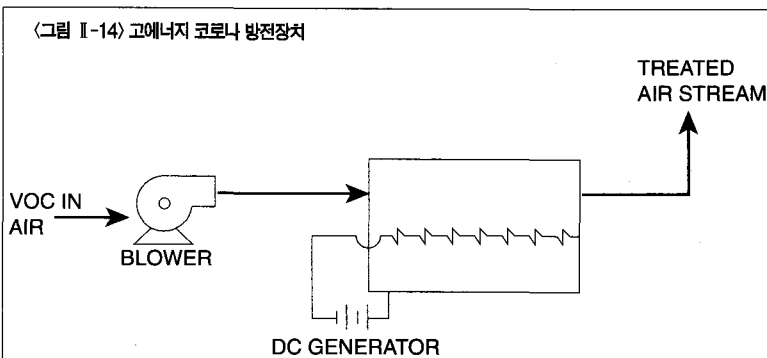
VOCs와 유해 대기오염물질을 제거하기 위한 코로나 방전공정에는 높은 직류가 걸려 있는 고 부전도성(high dielectric) barium titanium을 충전한 반응기를 사용하는 방법과 고압의 펄스에 의해 에너지를 공급받는 wire-in-tube 반응기를 사용하는 방법이 있다.

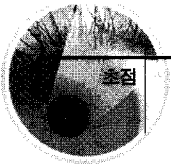
미국 환경청의 평가결과 2가지 방법 모두 도장 및 표면처리(painting & coating operation), 반도체와 전자부품 산업, 음식과 의약품 가공, 그리고 현장복원(site remediation) 등의 공정에 적용할 수 있다.

이 밖에도 가구 제조업, 드라이크리닝, 식당 등과 같은 상업분야에도 적용할 수 있으며 특히 첫 번째 방법의 경우 벤젠, 톨루엔, 그리고 MEK에 대한 제거효율이 90% 이상임이 보고되었다.

6.4. 최신 VOCs 제거기술의 비교

VOCs 제거기술의 선택시 VOCs 농도, 공기 흐름유속, 제거되어야 할 VOCs의 화학적 성분 및 장치비(equipment cost)가 반드시 고려되





어야 한다. VOCs의 농도가 낮을 경우 자본비와 운영비가 저렴하고 현장 제거(on-site removal)가 가능한 생물학적 여과법이 유리한 반면 처리해야 할 VOCs가 TCE, TCA 등과 같은 생분해성이 낮은 물질인 경우 생물학적 여과법은 소요경비만 상승시키고 제거효율은 저하된다.

이런 경우 증기 재생이나 고에너지 코로나 방전법이 보다 효과적이며 처리할 물질이 고가이고 재이용이 필요한 경우에는 막 분리법이 효과적이다. <표 II-16>은 3가지 최신 VOCs 제거기술의 장·단점, 경제성 및 적용가능 분야를 비교하여 제시한 것이다.

<표 II-16> 최신 VOCs 제거기술의 비교

기술	장·단점	용매 회수	자본비	운영비	적용가능 분야
증기 재생법	<ul style="list-style-type: none"> VOCs가 완전분해됨. 원하지 않은 화합물이 생성되지 않음. 산성 가스 제거장치가 필요함 폐 NaHCO₃ 슬러리 처리가 요구됨. 	불가	저렴함	고가임	<ul style="list-style-type: none"> 도장부스 토양중기 추출 시스템
막분리법	<ul style="list-style-type: none"> 고농도의 VOCs를 효과적으로 처리함. 부산물이나 원하지 않는 화합물을 생성하지 않음. 다단 분리 system이 요구됨. pump나 냉각장치가 요구됨 	가능	고가임	저렴함	<ul style="list-style-type: none"> PVC 제거 살균기로부터 염화에틸렌의 제거
고에너지 코로나 방전법	<ul style="list-style-type: none"> 저농도의 VOCs에 효과적임 연료가 필요없음. 규모확대의 문제가 발생함. VOCs가 불완전하게 파괴됨. 	불가	저렴함	저렴함	<ul style="list-style-type: none"> 드리이클리닝 공정 의약품 공정의 도장/코팅

자료 : AWMA, Emerging Solutions to VOCs & Air Toxics Control, Air & Waste Management Association, 1996. 2.

III. VOCs 방지기술의 적용사례

개별 VOCs 방지기술은 적용범위가 다양하여 배출특성에 따라 한 가지 기술 또는 가능한 기술을 혼성하여 사용할 수 있다. 본 장에서는 가능한 VOCs 방지기술을 현장이나 실험실에 실제 적용한 결과를 외국의 사례를 들어 제시하였다.

1. FTO를 이용한 VOCs 처리사례

펄프공장의 Kraft공정 약취는 대부분 메틸메르captan, 황화이메틸, 이황화이메틸, 황화수소 등의 황함유 휘발성 물질로부터 발생된다. 최근들어 이러한 휘발성 물질의 배출에 대한

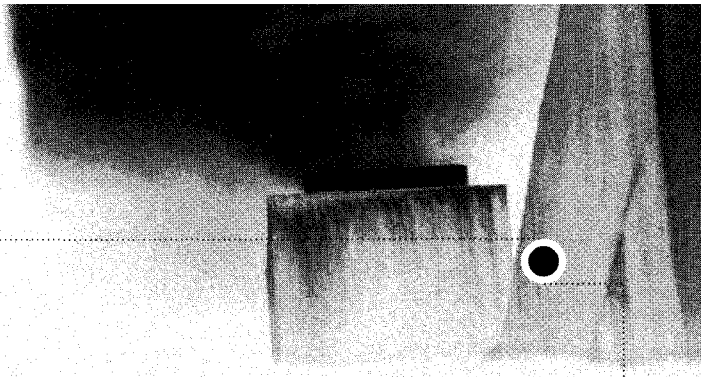
규제가 한층 강화되고 있고 물질처리에는 kiln이나 보일러 등을 이용한 소각이 가장 많이 이용되고 있다. 재래식 소각기술은 시민들의 인식부족과 높지않은 파괴 또는 제거효율의 한계로 인하여 배출된 황함유 물질제어를 위한 새로운 기술이 필요하게 되었다.

1994년과 1995년에 Thermatrix 사는 상당량의 황함유 VOCs를 포함하는 펄프공장의 비응축성 가스(Non-Condensable Gases : 이하 'NCGs'라 약함)를 처리하기 위해 무화염 산화 지원시스템(flameless oxidation back-up system)을 개발·설치하였다. 이 시스템은 ▲가스 유입기, ▲황함유 VOCs 파괴를 위한 무화염 열산화기, ▲SO₂제거를 위한 세정기, ▲연돌로 구성되며 1995년 8월에 사용이 허가되었다. 1,000시간의 예비 실험을 통해 다음과 같은 우수한 결과를 얻었다.

- ① 황 화합물에 대한 파괴 및 제거 효율이 99% 이상임.
- ② SO₂ 배출농도는 15ppm 미만이고 SO₂ 제거효율은 99.98% 이상임.
- ③ H₂S 배출농도는 5ppm 미만임.

이 새로운 프로젝트의 성공은 FTO가 VOCs 방지기술에 새로운 해결책이 될 수 있는 가능성을 제시한 것으로 인식되어지고 있다.

1.1. FTO의 펄프공장 적용상 특성



〈표 III-1〉 여러 가지 방지기술의 특성비교

특성	방지기술	응축	흡착	TO	CO	RTO	FTO
Odor Reduction		D	B	C	D	D	A
Gases		F	D	A	A	A	A
Low Flow & Low Conc.		B	A	B	A	D	B
High Flow & Low Conc.		C	A	C	A	A	C
Low Flow & High Conc.		A	D	A	D	D	A
High Flow & High Conc.		A	D	A	D	D	A
Hydrocarbon Gases		F	D	A	A	A	A
Cl ₂ /S Organic Gases		F	D	B	D	A	A
Hydrocarbon Condensables		A	A	A	A	A	A
Cl ₂ /S Org. Condensables		A	A	B	D	A	A
Particulates		F	F	C	F	F	F
Continuous		A	A	A	A	A	A
Batch or Variable		A	A	D	D	D	B
DRE		C	B	B	C	C	A

주) RTO : 재생 열산화법, TO : 열산화법, CO : 촉매산화법

A=월함, B=좋은, C=만족스러움, D=미비함, F=직접 적용불가

자료 : AWMA, Emerging Solutions to VOCs & Air Toxics Control, Air & Waste Management Association, 1996.2.

1.1. FTO의 펄프공장 적용상 특성

펄프 공장의 NCGs는 메틸메르캅탄, 이메틸메르캅탄, 황화이메틸, 황화수소 등과 같은 나무처리용 화학약품(wood processing chemical)이 많이 함유되어 있는데 이러한 화학약품은 TRS(Total Reduced Sulfur) 화합물의 일종으로 TRS 배출규제는 US EPA 40 CFR subpart BB에 명시되어 있다.

전통적인 방식에 따르면 5ppmv 이상의 TRS를 함유하고 있는 펄프공장 NCGs stream은 석회가마(lime

kiln)내의 연소에 의해 황 화합물이 염(salt)으로 전환되고 이를 대기로 방출하기 전에 가스 stream으로부터 제거된다. 그러나 펄프공장이 석회가마내에서 NCGs를 처리할 수 있는 능

력을 갖지 못하는 경우가 있고 더욱이 TRS의 대기방출을 엄격히 규제하고 있기 때문에 보다 새로운 NCGs 처리방법이 필요하게 되었다.

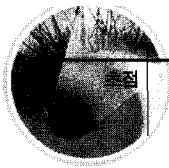
FTO 기술은 NCGs 처리에 적합한 여러 가지 특성을 지니고 있으며 다음 〈표 III-1〉에 여러 기술과의 특성을 비교하여 제시하였다.

NCGs 처리시 FTO 기술은 TRS 화합물을 산화물로 산화시키고 배출 가스내의 황 산화물을 제거하는 일련의 시스템으로 되어 있다. FTO의 기술 및 운영상의 특성은 〈표 III-2〉와 같다.

FTO 시스템은 15ppmv 미만의 SO₂, 5ppmv 미만의 TRS와 총탄화수소화합물(Total Hydrocarbon Compound : THC), 30ppmv 미만의 CO, 그리고 10ppmv 미만의 thermal NO_x 등과 같이 대기오염물질 배출규제를 만족하는 데 이렇게 엄격한 기준의 달성은 THC와 TRS의 경우 99.99% 이상되는 파괴효율

〈표 III-2〉 FTO의 기술 및 운영상의 특성

분 류	내 용
기술적인 특성	<ul style="list-style-type: none"> • 최적의 연소조건을 위해 NCGs stream, 공기 및 천연가스를 혼합함. • 예열된 산화기내에서 산화정도를 조절함. • 산화기 배기가스를 냉각시킴. • 황 회수 또는 공장에 재이용할 수 있도록 SO₂ 세정 등의 공정이 포함됨.
운영상의 특성	<ul style="list-style-type: none"> • NCGs stream을 batch 또는 연속적으로 처리할 수 있음. • 시스템 이용도(availability)가 높음. • 화학약품 회수와 재이용 가능성이 높음. • 경제적임.



을, SO₂의 경우 98% 이상 제거효율을 얻을 수 있어야만 가능하다.

1.2. NCGs의 오염원 및 조성

NCGs는 ① digester area,

condensate stripper, evaporater 등에서 생성되는 저용량 고농도(Low-Volume-High-Concentration : LVHC) stream과 ② washer, washer seal tank 등에서 생성되는 고용량 저농도(High-Volume-Low-

NCG stream 1-Tall Oil Plant

	Nominal	Low	High
Flow	1750ft ³ /min	1200ft ³ /min	2200ft ³ /min
Temperature	65.6℃	-	-
a-Pinene(C ₁₀ H ₁₆)	-	-	-
b-Pinene(C ₁₀ H ₁₆)	-	-	-
Hydrogen Sulfide(H ₂ S)	2100ppmv	1800ppmv	2500ppmv
methyl Mercaptan(CH ₃ S)	-	-	-
Dimethyl Sulfide(C ₂ H ₆ S)	-	-	-
Dimethyl Disulfide(C ₂ H ₆ S ₂)	-	-	-
Water(H ₂ O)	Unspecified	-	Saturated

NCG stream 2-Scrubber

	Nominal	Low	High
Flow	1200ft ³ /min	-	-
Temperature	65.6℃	-	-
a-Pinene(C ₁₀ H ₁₆)	530ppmv	-	-
b-Pinene(C ₁₀ H ₁₆)	150ppmv	-	-
Hydrogen Sulfide(H ₂ S)	1150ppmv	1100ppmv	1170ppmv
methyl Mercaptan(CH ₃ S)	500ppmv	475ppmv	500ppmv
Dimethyl Sulfide(C ₂ H ₆ S)	2820ppmv	2300ppmv	3200ppmv
Dimethyl Disulfide(C ₂ H ₆ S ₂)	650ppmv	400ppmv	850ppmv
Water(H ₂ O)	Unspecified	-	Saturated

NCG stream 3-Scrubber

	Nominal	Low	High
Flow	875ft ³ /min	750ft ³ /min	1000ft ³ /min
Temperature	65.6℃	-	-
a-Pinene(C ₁₀ H ₁₆)	530ppmv	-	-
b-Pinene(C ₁₀ H ₁₆)	150ppmv	-	-
Hydrogen Sulfide(H ₂ S)	8000ppmv	7029ppmv	8570ppmv
methyl Mercaptan(CH ₃ S)	10800ppmv	8400ppmv	15500ppmv
Dimethyl Sulfide(C ₂ H ₆ S)	7750ppmv	7000ppmv	9000ppmv
Dimethyl Disulfide(C ₂ H ₆ S ₂)	4700ppmv	2500ppmv	6800ppmv
Water(H ₂ O)	Unspecified	-	Saturated

자료 : AWMA, Emerging Solutions to VOC & Air Toxics Control, Air & Waste Management Association, 1996. 2.

Concentration : HVLC) stream의 2가지 형태로 발생되는데 유속은 각각 ~2,000ft³/min, ~1,200ft³/min 이고 온도는 79.4℃이며 물로 포화되어 있다.

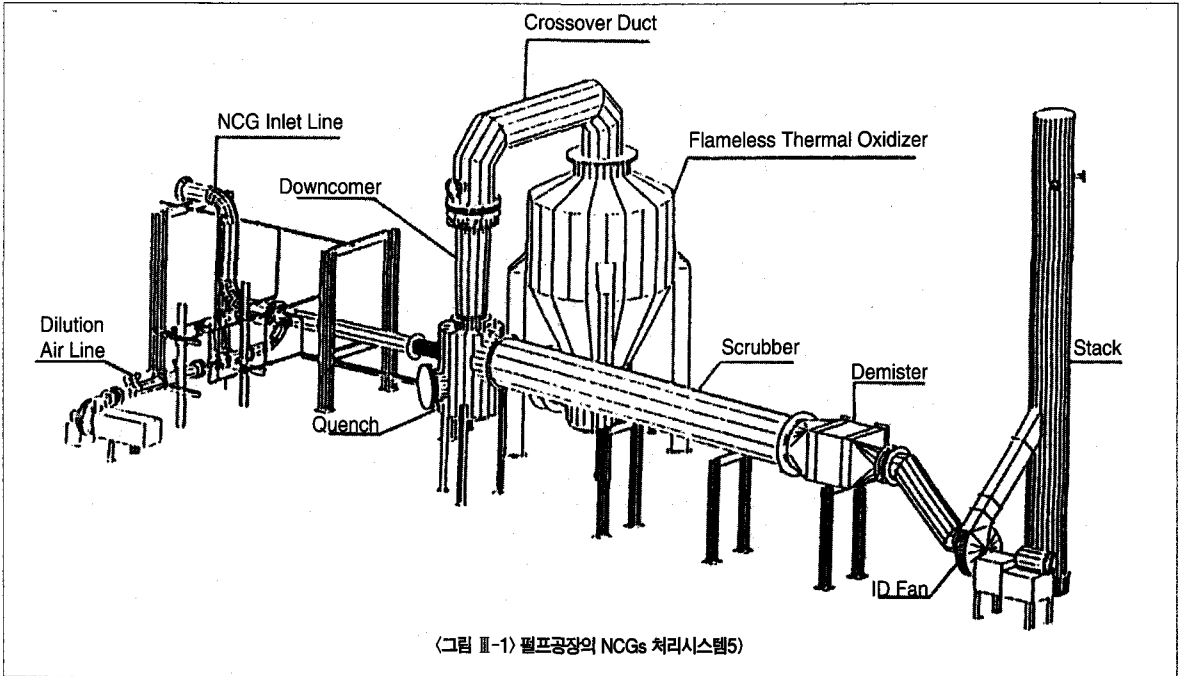
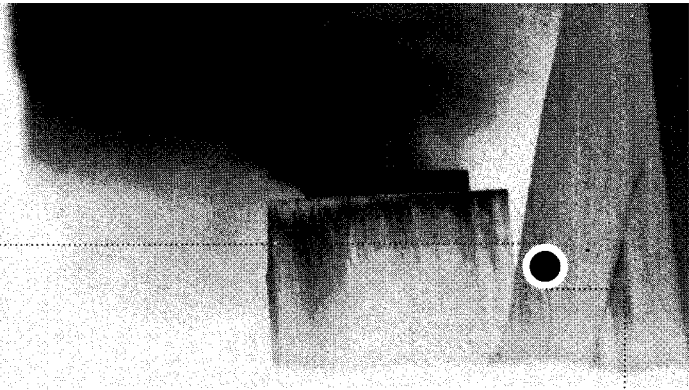
NCGs의 성분은 a-pinene, 황화수소, 메틸메르캡탄, 이메틸메르캡탄 그리고 이황화이메틸 등으로 화학적 분석을 통해 500~15,500ppm의 농도 범위에 포함되는 유해 화학약품들이 존재함을 확인할 수 있었다. 사례 연구를 통해 알려진 펄프공장의 NCGs 구성은 다음과 같다. Streams 1과 2는 HVLC NCG stream이고 3은 HVLC NCG stream이며 처리시 stream 1은 단독으로 처리되거나 Stream 2또는 3과 함께 처리된다.

1.3. NCGs의 처리시스템

본 사례연구에서 사용되고 있는 NCG 처리시스템은 공기NCGs-stream- 천연가스 혼합기체를 최고 3,400ft³/min까지, 산화반응의 온도를 871.1~1065.6℃로 조절할 수 있도록 설계되었다. <그림 III-1>은 펄프공장의 NCGs 처리시스템의 개략도를 나타낸 것이며 시스템의 주요 구성을 다음에 자세히 설명하였다.

(1) 가스유입기(NCGs inlet line)

NCGs stream내의 부유입자



(entrained droplet)는 NCGs stream상의 knock-out pot를 이용하여 제거되며 이 stream은 가스유입기에 유입되기 전에 화염포착기를 관통하게 된다. 가스유입기에 유입된 NCGs stream은 산화기내에서 최적 연소가 되도록 천연가스 및 공기(필요한 경우에 한하여)와 혼합된다.

(2) 무화염 열산화기

무화염 열산화기는 refractory lined 304SS outer containment shell, 흐름분산(flow distribution)을 위한 inner matrix plenum zone, 직선적인 흐름(flow straighting)을 위한 inner matrix DP zone, 열 연소를

위한 통합 반응 matrix, 그리고 반응 종결을 위한 Post-processing zone으로 구성되며 시스템의 제어와 성능 모니터링을 위한 thermocouple도 포함된다. 이 밖에 matrix를 운전온도까지 예열하기 위하여 연소공기 fan이 장착된 천연가스 연소 버너 시스템으로 구성된 예열 시스템도 포함된다.

FTO 시스템은 가스로부터 열을 흡수하거나 또는 가스에 열을 공급하는 thermal flywheel의 역할을 하는 층이 있어 안전하며 농도 범위가 넓은 NCGs stream도 처리할 수 있다.

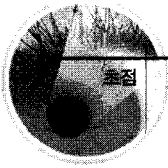
(3) Quench

1회 통과처리(once-through)형태

로서 황산에 의한 부식방지를 위해 Hastelloy™ C-22 metal을 이용하는 배수 웅덩이(sump), blowdown, fresh water make-up등이 통합된 개별적인(stand-alone) 장치이다.

또한 이 장치는 세정탑에 유입되기 전에 982.2℃의 산화기 배기가스를 stream 이슬점(dew point)인 약 79.4℃ 정도로 냉각시키기 위한 분무노즐과 신선한 물을 이용한다.

과잉의 물은 분무(atomization)와 증발로 인한 부족분을 막기위해 연속적으로 공급되며 quench의 pH를 4.0 또는 그 이상으로 조절한다. Quench에서 연속적으로 배출되는



증기는 펄프공장의 하수도로 유입된다.

(4) SO₂ 세정기 & Demister

직경 36', 316L SS 살수탑이 부착된 수평의 고효율 SO₂ 세정기가 사용되는데 압력 60 psi 정도의 plant air에 의해 분무되는 4개의 노즐은 세정기안으로 NaOH 또는 회반죽(white liquor) 등의 매개체를 분사한다. 이 세정기 노즐은 고효율 분무 능력으로 인해 O₂ 제거에 가장 좋은 크기인 5~50 μ m 범위로 분무된다.

노즐이 이처럼 매우 작은 크기의 분무성 작은 물방울(atomized droplet)을 생성시키기 때문에 비표면적이 매우 넓고 SO₂의 물질전달속도도 향상된다.

세정기의 분무성 작은 물방울을 제거하기 위해 세정기의 배출구쪽에 2개의 Chevron type의 demister가 연결되어 있고 고체입자의 침적방지를 위해 신선한 물로 연속해서 세척한다. SO₂세정에 사용되는 회반죽은 5% NaOH를 포함하고 온도는 48.9~65.6℃ 정도이며 pH는 13~14 정도이다.

(5) ID Fan & Stack

Demister와 30ft 높이의 340SS 타입인 배기연돌사이에 설치된 316SS induced draft fan은 FTO 시스템을

일정하게 약한 진공을 유지시켜 외부 누출(out-leakage)이 없도록 유지시킨다.

2. 비열 플라즈마 기술 (Non-Thermal Plasma Techniques)을 이용한 VOCs와 NO_x 처리 사례

비열 플라즈마 공정은 상압 기체 stream내의 저농도 VOCs, NO_x, HAPs의 방지에 적용할 수 있는 최신 기술로서 전기방전(electrical discharge) 또는 전자빔(electron beam)을 이용하여 플라즈마를 형성시킬 수 있다. 최근의 연구결과에 의하면 전자빔의 이용의 pulsed 코로나나 다른 형태의 전기방전 플라즈마 등을 이용하는 것보다 에너지 측면에서 효과적이며 비용분석 결과 RTO, RCO, 또는 혼성(hybrid) 시스템에 비해 경제적인 것으로 나타났다.

1970년대부터 발전소 배기가스내의 NO_x 제거에 전자빔을 이용하는 방법이 연구되어 왔고 최근들어 전기방전 방법이 배기가스 정화분야에 이용되고 있다. 특히 비열 플라즈마를 디젤엔진 배기가스내의 NO_x 처리에 응용하는 방안이 많은 관심이 집중되고 있는데 산소가 풍부한 경우 NO_x의 화학적 환원법은 자동차 등의 이

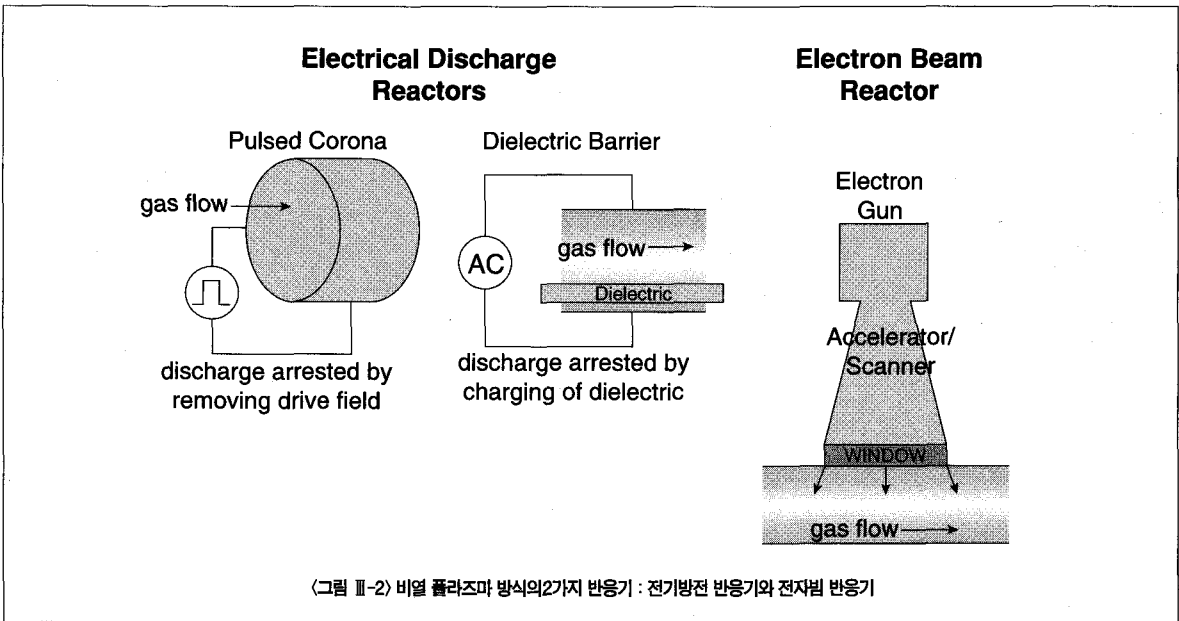
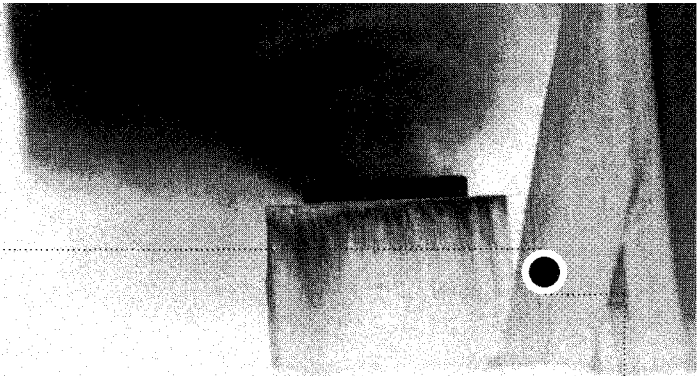
동오염원에 새로운 돌파구를 제시할 것으로 여겨지나 현재는 고정 연소오염원(stationary combustion source)에만 적용되고 있다.

2.1. 비열 플라즈마 공정의 개요

회박하고 부피유속이 클 경우 재래식 탄소흡착법이나 RTO, RCO 등은 연간 경비(annual cost)가 많이 소요되고 특히 큰 부피 유속으로 인하여 시간에 따라 운영비가 설치비보다 더 많이 소요되므로 새로운 제어방법이 필요하게 되었다.

비열 플라즈마 공정은 전기 에너지의 대부분이 기체의 가열보다는 강력한 전자를 생산하는데 이용되며 변환점에서 플라즈마가 발생하는 원리를 이용한 것으로 전자 충격 해리(electron-impact dissociation)나 배경(background) 기체분자의 이온화를 통해 강력한 전자가 오염물질 분자를 산화, 환원, 또는 파괴할 수 있는 자유기와 이온 및 또 다른 분자를 생성하게 된다. 대부분 저농도 대기 오염물질을 제어할 경우 에너지를 선택성으로 인하여 비열 플라즈마 방법이 가장 많이 적용된다.

전기 방전이나 전자빔은 다양한 경로로 이루어지며 전기방전 반응기는 전극 구조와 교류, 직류, 펄스 등의 전기 공급방식에 따라 여러 가지 형



태가 있다. 이들 중 가장 많이 연구되는 것은 〈그림 Ⅲ-2〉에 제시된 코로나와 부전도성 장벽 방전(dielectric-barrier discharge)에 기초한 2가지 경우이다.

Pulsed 코로나 방법에서 반응기는 고전압의 매우 짧은 진동에 의해 작동되어 강력한 전자들로 이루어진 수명이 매우 짧은 방전 플라즈마를 생성시키고 이 플라즈마가 처리대상 기체를 분해할 수 있는 자유기를 생산한다. 부전도성 장벽방전 반응기의 경우 전극의 한면 또는 양면을 유리나 알루미늄 등과 같은 부전도체로 덮는다. Pulsed코로나 방법에서는 플라즈마의 일시적 움직임이 전압 진동에 의해 작동되는 반면 부전도성 장

벽방전에서 발생하는 플라즈마는 부전도성 층위의 전하축적(charge build-up)이 국소 전기장(local electric field)을 감소시킬 때 발생된 플라즈마가 저질로 소멸된다. 무성(silent) 방전 반응기라고도 불리는 부전도성 장벽방전 반응기는 오존 생성에 많이 이용되고 있으나 오존 생성에 사용되는 플라즈마 조건과 VOCs나 HAPs의 제거에 사용되는 플라즈마의 최적조건은 서로 다르다.

과거에는 MeV형태의 전자빔 가속기의 높은 자본비와 X선 위험으로 인하여 오염제어공정에 많이 사용되지 않았으나 최근들어 고분자 물질의 가교결합(cross-linking), 무용제 표면처리(solvent-free coating)의 보존,

인쇄용 잉크의 건조 등과 같은 산업적 응용에서 요구조건을 만족시킬 수 있는 간편한 200keV이하의 저에너지 전자 가속기가 개발되어 상업적으로 응용되고 있으며 환경오염 제어분야에도 적용되고 있다.