

복합대기오염 저감 시스템을 위한 오존 고속산화 기반 고도산화공정

엄성현[†] · 홍기훈 · 황상연

고등기술연구원 플랜트공정개발센터
(2021년 4월 20일 접수, 2021년 5월 11일 수정, 2021년 5월 15일 채택)

An Ozone-based Advanced Oxidation Process for an Integrated Air Pollution Control System

Sunghyun Uhm[†], Gi Hoon Hong and Sangyeon Hwang

Plant Process Development Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin 17180, Korea
(Received April 20, 2021; Revised May 11, 2021; Accepted May 15, 2021)

초 록

미세먼지와 함께 질소산화물, 황산화물, 휘발성 유기화합물, 암모니아 비롯한 유발물질에 대한 동시 저감기술은 엄격해지는 환경규제와 실질적인 저감효과 제고를 위해 꾸준히 주목받아 왔다. 오존산화에 의한 비수용성 질소산화물 고속산화 공정은 전통적으로 적용되고 있는 선택적 촉매환원 공정에 비해 공간절약형 시스템 적용을 가능하게 할 뿐만 아니라 운영비용 절감 측면에서 매우 효과적인 방법으로 평가되고 있으며 황산화물을 비롯한 산성가스도 동시 저감이 가능한 공정 구현이 가능하다는 장점까지 있다. 본 논문에서는 오존 고속산화 공정에 대한 기술 이슈 및 개발 동향을 소개하며 향후 산업적 이용 확대를 위한 개발 방향에 대해서 고찰하고자 한다.

Abstract

Simultaneous removal technologies of multi-pollutants such as particulate matters (PMs), NO_x, SO_x, VOCs and ammonia have received consistent attention due to the enhancement of pollutant abatement efficiency in addition to the stringent environmental regulation and emission standard. Pretreatment of insoluble NO by an ozone oxidation can be considered to be more effective route for saving space occupation as well as operation cost in comparison with that of traditional selective catalytic reduction (SCR) process. Moreover the primary advantage of ozone oxidation process is that the simultaneous removal with acidic gas including SO_x is also available. Herein, we highlight recent studies of multi-pollutant abatement via ozone oxidation process and the promising research topics for better application in industrial sectors.

Keywords: Air pollution control, Ozone oxidation, Wet electrostatic precipitation, NO_x, Particulate matters

1. 서 론

해마다 반복되고 있는 고농도 미세먼지 심화로 인한 국민 불안 증가로 인해 정부차원에서도 미세먼지 감축을 위한 정책, 기술적 노력을 집중하고 있으나, 여전히 국민이 체감할 수 있는 성과는 미흡함에 따라 관련한 환경 기준 및 원인물질 배출 허용 기준도 강화되고 있는 추세이다. 최근 발생하는 대부분의 미세먼지는 석탄화력발전소, 폐기물처리시설 등의 고정오염원 및 차량, 선박, 건설기계 등의 이동오염원을 포함하는 인간들의 생산 활동 과정에서 만들어낸 대기현상으로 생성된다고 볼 수 있으며, 직접적인 1차 (초)미세먼지 뿐만 아니라 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 휘발성유기화합물(VOCs), 암모니아

(NH₃) 등 유발물질에 의한 2차 생성 미세먼지의 비율과 영향이 보다 구체적으로 알려지면서 특히 배출가스 및 미세먼지 동시 처리가 가능한 새로운 복합 저감 기술이 더불어 요구되고 있다[1-3].

미세먼지, NO_x, SO_x, VOCs, NH₃ 및 수은(Hg) 등 대기오염물질을 개별적으로 처리할 수 있는 기술은 꾸준히 연구 개발되어 왔고, 다양하게 적용되고 있다[4-12]. 특히, 주요 미세먼지 배출 사업장인 화력발전소는 Figure 1(a)에 도식화된 바와 같은 연속 공정을 구성하여 연료의 연소에서 발생하는 다양한 오염물질을 처리하고 있다. 연소과정에서도 일련의 최적화 공정을 적용하여 오염원 발생을 최소화하며 배기가스는 첫 번째 단계로 질소산화물 처리(denitrification, DeNO_x)를 목적으로 선택적무촉매환원법(SNCR, selective non-catalytic reduction) 공정을 거친다. 촉매를 사용하지 않으며, 850~1100 °C 온도 범위에서 작동하며 암모니아 혹은 요소수를 환원제로 사용하여 질소(N₂)와 물(H₂O)로 전환시킨다. SNCR 기술은 초기 투자비 및 운영비가 상대적으로 경제적이기 때문에 소각장, 산업용 보일러, 시멘트 제조공정에 널리 적용되고 있으나 NO_x 처리효율은 25~40% 수준이다. 후속공정

[†] Corresponding Author: Institute for Advanced Engineering, Plant Process Development Center, Yongin 17180, Korea
Tel: +82-31-330-7494 e-mail: elektrik@iae.re.kr

Table 1. Advantages and Disadvantages of Several DeNOx Technologies

Types	Advantages	Disadvantages
Ozone-based gas-phase AOP	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Simultaneous removal of gaseous NOx, SOx and particulate matters ✓ Relatively lower operation temperature ✓ Lower pressure drop in processes ✓ Relatively smaller foot-print 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Complex instrument required ✓ High power consumption for ozone generation ✓ Relatively higher capital cost
SCR (Selective Catalytic Reduction)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Suitable for large-scale NOx reduction -up to 90% ✓ Can be utilized in a wide range of systems including industrial and municipal plants ✓ Can be used in addition to Diesel particulate filters (DPFs) to reduce particulate matter emissions in diesel engines ✓ The set-up is simple to install 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Unreacted ammonia might slip through the SCR catalyst due to over-injection (ammonia slip) ✓ The catalyst required for the reduction is expensive to replace ✓ The catalysts are prone to contamination by compounds in the combustion gas
NCR (Selective Non-Catalytic Reduction)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ The set-up is simple to install ✓ Relatively lower capital and operating costs compared to SCR ✓ Saves costs on expensive replacement of catalysts ✓ Retrofitting of components in large-scale boiler units is relatively easy, incurring little downtime 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Requires a narrow range of temperatures for effective NOx reduction ✓ Not suitable for large-scale NOx reduction ✓ Retrofitting of components in smaller boiler units is difficult due to space considerations for installing the components ✓ Prone to ammonia slip which leads to accidental NOx emissions

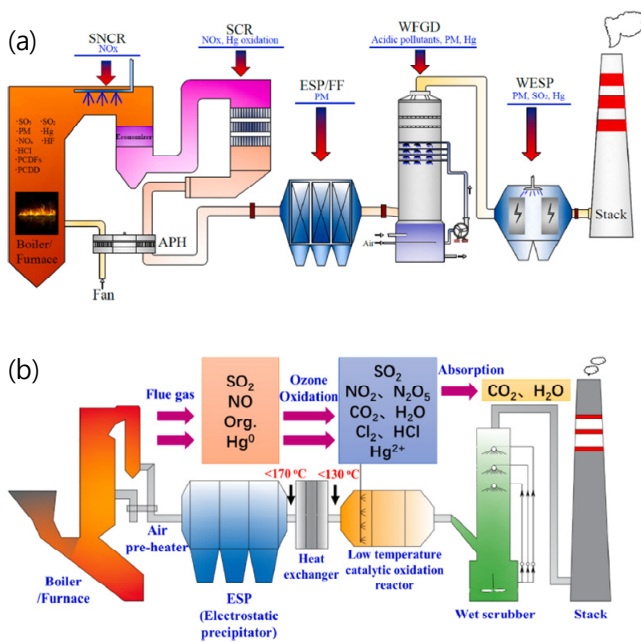


Figure 1. Schematic diagram for multi-pollutants removal by (a) typical technical route and (b) ozone oxidation process[4].

으로 선택적촉매환원법(SCR, selective catalytic reduction)이 적용된다. SCR 공정은 300~450 °C 온도 범위에서 작동하며 제거효율을 70~90% 까지 높일 수 있다. 하지만 촉매의 성능, 배기가스 및 환원제의 분배, 균일한 온도 유지 등 작동 환경에 민감하게 영향을 받는다. DeNOx 공정 이후에는 미세먼지 처리를 위하여 전기집진기(electrostatic precipitators)를 이용하며, 이후 SOx 및 산성가스 처리를 위하여 습식스크러버(WFGD, wet flue gas desulfurization) 공정이 이어진다. 그리고 WFGD 후단에 습식전기집진장치(WESPs, wet electrostatic precipitators) 설치하여 미세먼지 및 액적 등 배출되는 오염물질을 극소화한다[13]. Figure 1(a)에 도식화된 발전소 적용 전통적인 후처리 설비는 제거 효율이 설치 면적에 크게 의존하고, 개별 공정들이 인접 공정의 처리효율에 영향을 주게 되며 높은 투자비와 유지비 문제가 있고 중

소규모 사업장에서는 효율성이 떨어지는 문제가 있기 때문에 기존 설비와 호환성이 높고 저온 환경에서도 컴팩트한 통합 처리 공정이 가능한 저비용, 고효율, 고안정성 저감 기술의 필요성이 증대되고 있다.

Table 1에서 NOx 처리를 위한 후보 기술들의 특징점을 비교하였다. SCR 기반 NOx 처리공정은 사용되는 촉매의 성능과 내구성을 안정적으로 유지시킬 수 있는 적정 환경 유지가 매우 중요하기 때문에 전체 공정 구성에서 인접 공정과의 호환성 부족 문제가 발생하여 사업장에서는 대체 기술에 대한 관심이 점점 높아지고 있는 상황이다. 특히, NOx 처리도 SOx 처리와 함께 습식스크러버 공정 적용이 가능할 수 있도록 Figure 1(b)와 같은 오존산화 기술을 적용한 연구 개발이 지속적으로 진행되어오고 있다[4,14-19].

본 논문에서는 복합대기오염물질 저감을 위한 핵심 요소기술인 오존산화 기술에 대한 개발 이슈들을 소개하며, 특히 NOx 처리 관점에서 산업적 이용을 확대시킬 수 있는 활용방안 등을 고찰해보고자 한다.

2. 오존산화 반응의 원리 및 활용 기술

연소과정에 발생하는 고온의 배기가스에 포함된 질소산화물(NOx)은 열역학적으로 NO 형태로 배출되며 전체 NOx 중에 90~95%를 차지한다. Table 2에서 볼 수 있듯이 NO는 극히 낮은 물 용해도를 갖기 때문에 산업체에서 흔히 사용하고 있는 스크러버 혹은 WFGD 공정을 적용하여 처리할 수 없다. 반면에 용해도가 매우 높은 NO2 혹은 N2O5 형태의 질소산화물은 스크러버 방식의 흡수공정이 효과적일 수 있기 때문에 이를 위한 효과적인 산화공정이 필요하게 된다. 이렇게 되면 SO2를 비롯한 황산화물과 NOx 및 수은(Hg)까지도 동시에 처리할 수 있는 공정이 구현될 수 있다.

많은 연구에서 NaClO, NaClO2, H2O2, KMnO4 등의 수용성 산화제와 NaOH, Ca(OH)2, NH4OH, Na2SO3 등의 흡수제를 연속적으로 사용하여 비수용성 NO를 수용성화 시키고 흡수제로 중화시키는 공정을 구현하였다[20-22]. NO 처리효율은 90% 이상이며 공존하는 SO2 농도에 따라서는 처리효율은 소폭 증가할 수 있다고 보고되고 있다. 다만, 비수용성 NO와 수용성 산화제의 기-액 반응이 scale-up 단계에서 적절히 구현될 수 있을지는 추가적인 연구가 필요하며, 기술을 적용하는 산업체 입장에서는 취급해야 하는 화학물질이 증가한다는 부담이 존재

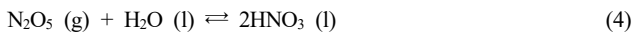
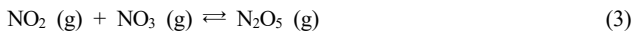
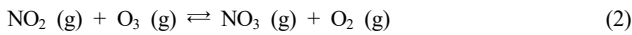
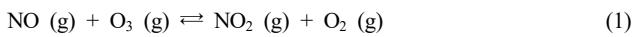
Table 2. Basic Properties of Nitrogen Oxides[4,7]

Properties	N ₂ O	NO	NO ₂	N ₂ O ₅
Color	Colorless	Colorless	Red-brown	White powder
Solubility in water (g/dm ³)	0.111	0.032	213	500
State of matter (@ ambient temperature)	Gas	Gas	Gas	Solid

하게 된다.

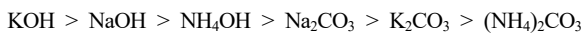
이에 비해 오존산화는 수처리 공정에서 이미 널리 적용되어 왔고 매우 빠른 산화반응 구현이 가능할 뿐만 아니라 추가적인 부산물을 배출하지 않는 장점으로 최근 DeNOx 공정 적용을 위한 활발한 연구가 본격화되고 있다.

NO의 오존산화 반응은 아래와 같다.



이때 투입되는 오존의 양에 따라 생성물의 조성이 변화하게 되는데, O₃/NO 비율이 1보다 작게 되면 식 (1)이 주요 반응이 되어 주요 생성물은 NO₂가 되며, O₃/NO 비율이 1보다 크게 되면 식 (3)까지 반응이 확장되어 N₂O₅가 주요 생성물이 될 수 있는 환경을 만들 수 있다[18]. N₂O₅가 주요 생성물이 되면 Table 2에서와 같이 물 용해도가 2배 이상 증가하게 되기 때문에 제거효율을 획기적으로 증가시킬 수 있게 된다. 다만, N₂O₅가 주요 생성물이 되기 위해서는 O₃/NO 비율이 2 이상 높게 유지해야하는 조건이 충족되어야하기 때문에 전기에너지 투입량이 기하급수적으로 증가하게 된다[19]. 실제로 산업현장에서는 에너지 과다 사용에 따른 경제성 악화 문제가 오존산화 방식에 의한 DeNOx 공정 적용에 가장 큰 걸림돌이 되고 있는 실정이다. 이에 따라 오존산화 반응에 이어지는 스크러버 공정에 알칼라인 흡수제를 사용함으로써 단순 용해가 아닌 중화반응을 유도함으로써 NOx 제거효율을 증가시키게 되는 것이다[18].

사용하는 알칼라인 흡수제의 종류와 농도에 따라 반응성이 차이가 발생하며, 예를 들어 NaOH의 경우 2 wt% 정도에서 최적화되지만 Na₂CO₃의 경우는 10 wt% 수준까지 사용하여야 적정 수준의 제거효율을 얻을 수 있다[22]. 사업장에서 사용될 수 있는 알칼라인 흡수제의 반응활성 순서는 아래와 같다.



이때 적용하고자 하는 알칼라인 흡수제는 반응활성, 가격, 사업장내 취급성 등을 고려하여 결정된다. 흡수제로써 NaOH 희석용액을 사용하게 되었을 때는 아래의 반응식과 같이 쉽게 수용성 염으로 전환시킬 수 있다.

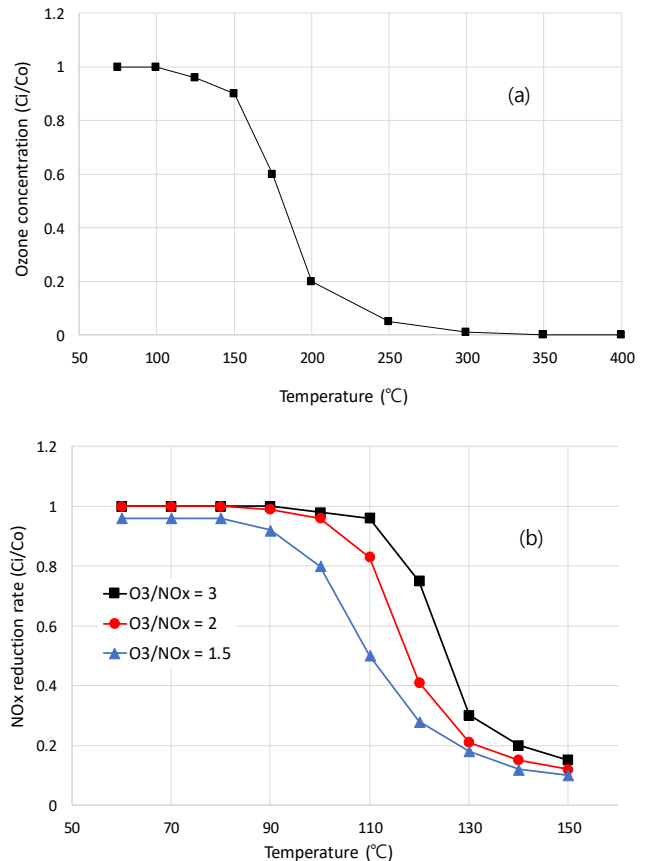
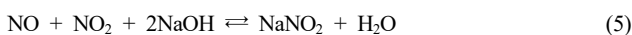


Figure 2. (a) The decomposition of ozone at increasing gas temperature. (b) NOx reduction rate at various temperature.

오존산화 반응을 효과적으로 적용하기 위해서는 식 (1)~(4)의 반응과 양론 특성 외에도 환경에 따른 반응 특성을 이해해야 한다. 앞에서 설명한 바와 같이 NO 대비 오존의 투입량을 적절히 조절하는 것이 전체 공정의 에너지 소모량을 결정하게 되고 결과적으로 경제성을 좌우하기 때문이다.

오존은 높은 온도에서 쉽게 분해되는 성질이 있기 때문에 오존산화 반응의 온도 제어가 매우 중요하다. Figure 2에서 볼 수 있듯이 100 °C 이상이 되면 오존이 자체적으로 분해하게 되어 실질적으로 반응에 참여할 수 있는 오존 농도가 감소하게 된다. 때문에 Figure 2(b)에서와 같이 불가피하게 높은 온도에서의 반응이 필요할 경우에는 오존 투입량을 높여야 NO 제거효율을 유지할 수가 있다. 따라서 이를 효과적으로 대응하기 위한 공정도 개발되고 있다. Figure 3에서는 선박에 효과적으로 적용할 수 있는 오존산화 공정을 소개하고 있다. Figure 3(a)에서 보듯이 250 °C 폐가스가 오존과 접촉하는 동시에 바로 후단에 습식 스크러버 공정을 연속적으로 구성함으로써 자연스럽게 온도를 낮추는 효과를 얻게 되어 반응기 내에 오존 농도를 적절히 유지시켜 줄

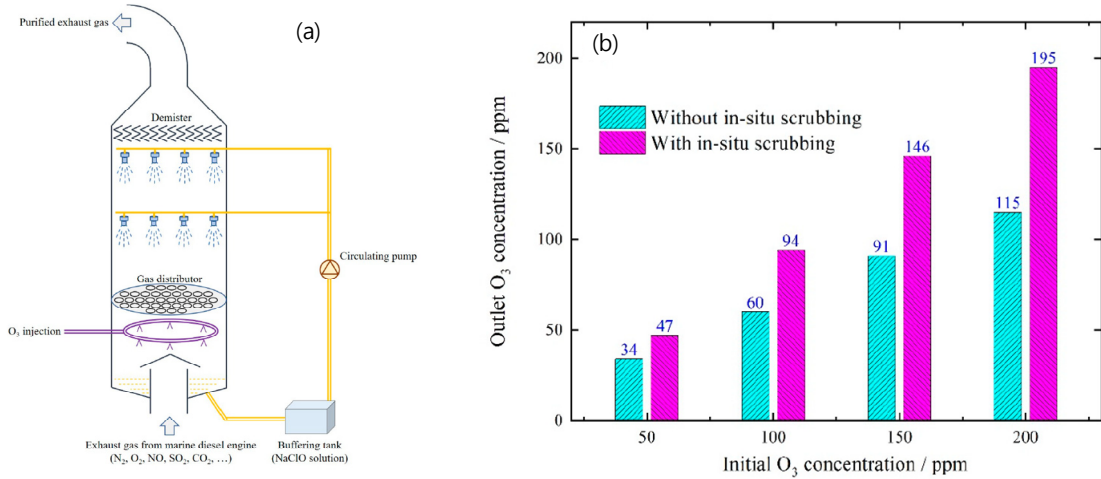


Figure 3. (a) The proposed process diagram for the simultaneous removal of NO and SO₂ from marine exhaust gas by ozone injection combined with *in-situ* wet scrubbing oxidant solution. (b) The effects of wet scrubbing on outlet O₃ concentrations with inlet flue gas temperature of 250 °C[16].

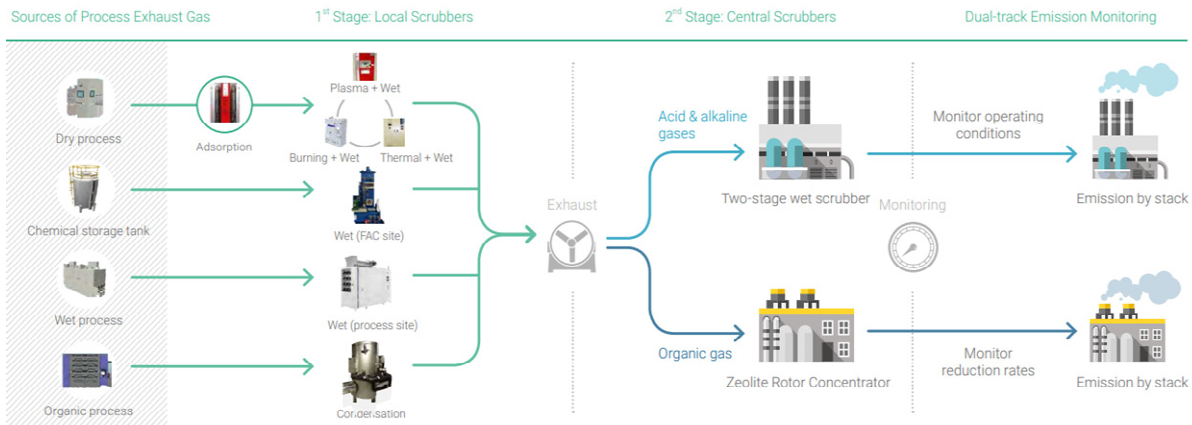


Figure 4. Air pollution control procedures in semiconductor fabrication processes of TSMC[23].

수 있도록 설계하였다.

생성물로서 NO₂와 N₂O₅를 결정하는 것은 투입된 오존의 양론비와 함께 반응기 내에서의 체류시간(residence time)도 크게 영향을 준다 [4]. 때문에 효과적인 오존산화 공정 적용을 위해서는 오존 자체의 특성과 NO와의 반응 특성을 고려한 반응기 설계와 공정최적화 단계가 매우 중요하다.

3. 반도체 공정에서의 복합오염물질 저감 기술

NO로 대표되는 질소산화물 저감에 대한 필요성은 화력발전소, 폐기물처리시설 등 대표적인 다량 배출시설에서 특히 요구된다. 단순한 질소산화물의 경우에는 제거효율이 높은 SCR 공정이 효과적이지만 대부분 미세분진이 더불어 존재하며 습도가 높은 환경에서는 효율성이 매우 낮기 때문에 오존산화 기술을 이용한 고속산화 공정을 점차 도입하고 있다. 오존산화 공정은 오존 투입량에 의해서 경제성이 좌우되는 특성으로 인해 오존 투입량을 적절히 제어하고 체류시간과 흡수제에 의한 스크리빙 공정을 최적화하여 적용되고 있다. 특히 공간적 제약에 대한 부담이 적고 오존에 대한 부식문제, 대용량, 다단계 스크리버 장치 투자에 대한 비용을 감당할 수 있는 대단위 화력발전소 및 석유화학공정에서 검증되어 점차적으로 보급되고 있는 추세이다.

국내에서는 최근에 발전사를 중심으로 관심을 표명하고 있으며, 해외의 경우에는 Linde, DuPont, BELCO 등에서 LoTOx (low temperature oxidation)라는 시스템을 개발하여 자사 공정에 활발히 적용하고 있다.

질소산화물 저감에 문제는 비단 발전소나 폐기물처리 시설에 대한 문제가 아니며, 최근에는 반도체 제조공정에서 매우 민감한 이슈가 되고 있다. Figure 4에 대표적인 반도체 제조사인 대만의 TSMC사의 반도체 제조공정에 설치된 대기오염제어 공정도를 보여주고 있다[23]. 반도체 제조공정에서는 산성가스, 알칼리가스, 유기성가스를 비롯한 여러 특수가스를 복합적으로 취급하기 때문에 복합대기오염물질 처리가 가능한 통합시스템이 지속적으로 요구되고 있으며[24], 이러한 복합 대기오염물질을 처리하는 과정에서 대기오염물질이 추가적으로 발생하는 문제점까지도 발생하고 있다. 질소산화물은 그중 하나이며, 반도체 제조공정의 운영환경 및 입지조건 특이성으로 인해 앞서 설명한 오존산화와 스크리빙 방식 적용은 매우 제한적이기 때문에 별도의 공간집약적인 고집적화 기술 적용이 요구된다.

반도체 제조공정은 다양한 부식성 가스 사용에 따라 발생하는 미세분진 처리를 위해 스크리버와 함께 습식 전기집진기를 사용하고 있다. 일반적으로 산업현장에 적용되고 있는 건식 전기집진기술의 경우 불안정한 코로나 방전, 먼지의 전기비저항에 따른 재비산 및 역코로나 발생 등으로 집진 효율이 저하되는 문제점을 지니고 있다. 반면에 습

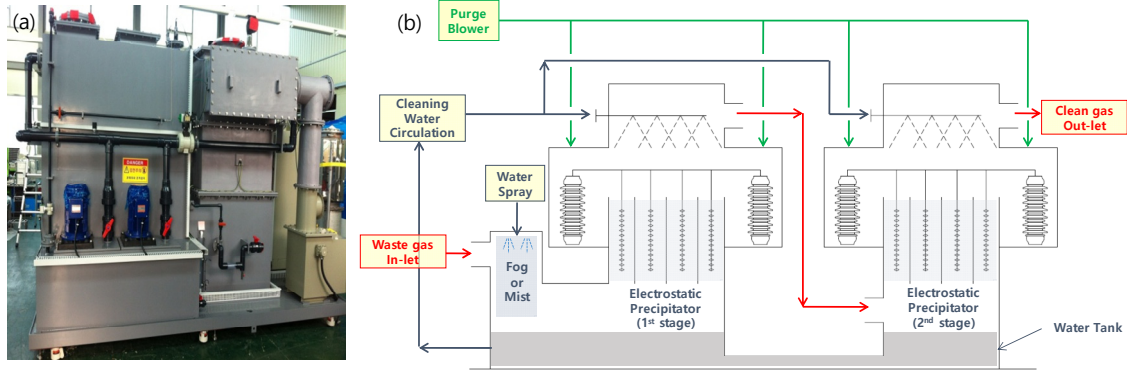


Figure 5. (a) Photograph and (b) schematic design of 5 CMM horizontal-type dual wet electrostatic precipitator (WESP) system.

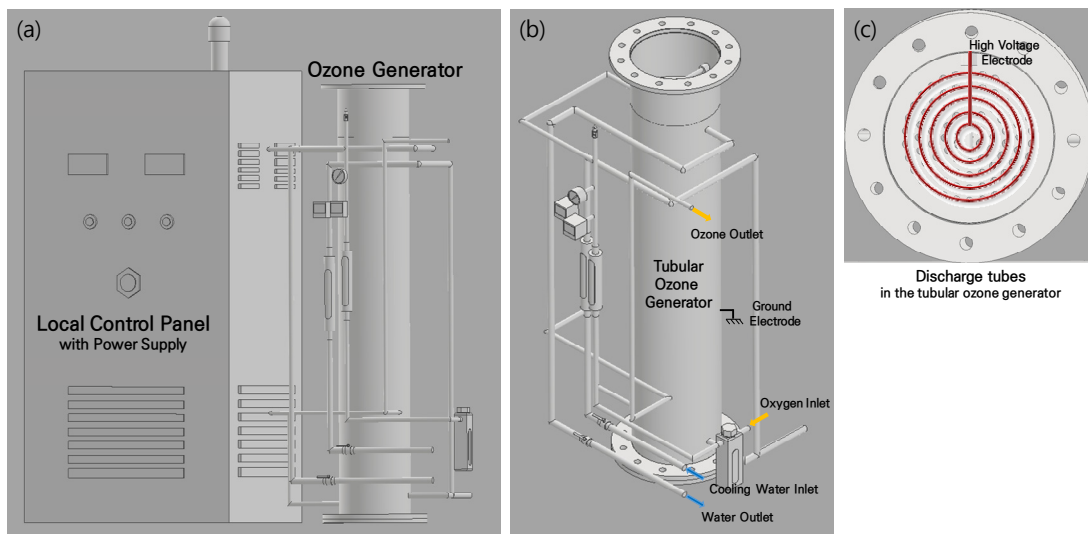


Figure 6. Schematic design of (a) tubular-type ozone generator system, (b) more detailed structure of tubular ozone generator, and (c) discharge tubes and high voltage electrode in the tubular ozone generator, respectively.

식 전기집진기술은 정전분무기술 등을 활용하여 집진극 사이에 물분자를 미세액적 형태로 투입하여 정전력에 의한 유도 충돌 효과를 극대화할 수 있는 장점이 있다. 현재 산업현장에서 통용되고 있는 습식 전기집진기술은 집진극에 부착된 먼지를 간헐적으로 물로 씻을 수 있는 기능이 부가된 것만을 의미하는 경우가 대부분이지만, 고도로 안정된 전원공급장치 설계와 집진장치와의 매칭기술을 효과적으로 적용한다면 Figure 5와 같이 미세액적이 상시 공급된 환경에서도 안정적인 운전이 가능하다. 때문에 일반적인 조건에서 스크러버의 1/10 정도의 물 사용과 적은 설치면적으로도 유사한 미세먼지 제거효율을 보여줄 수 있는 습식 전기집진기술을 스크러버 대체 기술로써 오존산화 공정과 접목한다면 반도체 제조공정에 효과적으로 적용될 수 있는 공간절약형 DeNOx 통합공정이 될 수 있다. 물론, 이를 위해서는 고안정성 고주파펄스 전원공급장치, 균일한 코로나 발생을 위한 전극설계 기술 및 설치면적을 최소화할 수 있는 고집적 습식 전기집진기 상설 설계 기술이 필수적이다.

오존산화를 위한 오존발생기 및 전기집진기는 모두 플라즈마 생성 원리를 이용하는 응용 기술이다. 따라서 오존발생기 및 전기집진기를 구동하기 위해서는 고전압 전원공급장치가 필수적으로 요구된다[25]. Figure 6에는 산업현장에서 볼 수 있는 관형 오존발생장치의 모식도를 표현하였다. 오존발생장치는 크게 오존발생부와 전원공급장치를

포함한 제어부로 구성되어 있다. 외형적으로도 오존발생장치에서 전원공급장치가 차지하는 것이 매우 크다는 것을 쉽게 알 수 있다. 하지만, 실질적으로 연구개발 대상은 Figure 6(b)의 오존발생부를 중심으로 하는 전극 소재 및 구조 개발에 치우쳐 있는 것이 사실이다. 그러면서 전원공급장치는 시장에서 통용되는 일반적인 제품을 채택하여 전체 시스템을 제작하게 된다. 문제는 시장에서 범용으로 유통되는 전원공급장치는 우리가 설계한 오존발생기에 맞춤형 설계로 제작된 제품이 아니라는 것이다. 이러한 경우 대개 단기적인 성능은 충족시켜 줄 수 있으나 구동 환경 변화에 따른 내구성이 결여되어 전체 시스템의 상품성을 저하시키는 치명적인 문제점을 가지게 된다. 이러한 문제는 습식 전기집진기도 마찬가지여서 상시 습식 환경에서 안정적으로 운전이 가능하도록 하는 고안정성 전원공급장치 개발이 연구개발의 최우선 순위가 되어야 한다. 더불어 전기집진기와 최고의 호환성 유지를 위한 매칭기술이 적절히 접목되어야만 사용자가 요구하는 품질 수준을 만족시킬 수 있다.

4. 결 언

오존산화, 중화흡수, 전기집진 등의 기술들은 이미 산업현장에 활발히 적용되고 있을 만큼 성숙된 기술이라고 볼 수 있다. 하지만, 모든 사

업장에서 사용자들이 만족할 수 있는 수준의 성능으로 적용되고 있는 것이라 보기도 어렵다. 이것은 최근 정부에서 강조하고 있는 소재·부품·장비 분야 개발을 중점적으로 추진하고 있는 것에도 맥락을 같이 한다.

따라서 전체 시스템 및 개별 공정에 대한 기술 수준을 높이는 연구 개발과 더불어 핵심 요소기술 및 부품 개발이 동반되어야 하며, 특히 최근 연구개발에서 강조되고 있는 학제 간 융합연구가 충분히 뒷받침되어야만 산업현장에서 요구하는 기술적 이슈를 해결할 수 있다.

감 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구결과입니다(No. 20009414).

References

1. J. Plautz, Piercing the haze, *Science*, **361**, 1060-1063 (2018).
2. Y-B. Zhao, P-P. Gao, W-D. Yang, and H-G. Ni, Vehicle exhaust: An overstated cause of haze in China, *Sci. Total Environ.*, **612**, 490-491 (2018).
3. H-W. Park and S. Uhm, Various technologies for simultaneous removal of NOx and SO₂ from flue gas, *Appl. Chem. Eng.*, **28**, 607-618 (2017).
4. F. Lin, Z. Wang, Z. Zhang, Y. He, Y. Zhu, J. Shao, D. Yuan, G. Chen, and K. Cen, Flue gas treatment with ozone oxidation: An overview on NOx, organic pollutants, and mercury, *Chem. Eng. J.*, **382**, 123030 (2020).
5. P. Córdoba, Status of flue gas desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs, *Fuel*, **144**, 274-286 (2015).
6. S. Yang, X. Pan, Z. Han, D. Zhao, B. Liu, D. Zheng, and Z. Yan, Removal of NOx and SO₂ from simulated ship emissions using wet scrubbing based on seawater electrolysis technology, *Chem. Eng. J.*, **331**, 8-15 (2018).
7. K. Skalska, J. S. Miller, and S. Ledakowicz, Trends in NO(x) abatement: A review, *Sci. Total Environ.*, **408**, 3976-3989 (2010).
8. Z. G. Lei, C. P. Wen, and B. H. Chen, Optimization of internals for selective catalytic reduction (SCR) for NO removal, *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 3437-3444 (2011).
9. D. Q. Dao, L. Gasnot, K. Marschallek, A. El Bakali, and J. F. Pauwels, Experimental study of NO removal by gas reburning and selective noncatalytic reduction using ammonia in a lab-scale reactor, *Energ. Fuel*, **24**, 1696-1703 (2010).
10. X. Zhang, B. Gao, A. E. Creamer, C. Cao, and Y. Li, Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: A review, *J. Hazard. Mater.*, **338**, 102-123 (2017).
11. C. Dai, Y. Zhou, H. Peng, S. Huang, P. Qin, J. Zhang, Y. Yang, L. Luo, and X. Zhang, Current progress in remediation of chlorinated volatile organic compounds: A review, *J. Ind. Eng. Chem.*, **62**, 106-119 (2018).
12. Y. S. Gao, Z. Zhang, J. W. Wu, L. H. Duan, A. Umar, L. Y. Sun, Z. H. Guo, and Q. Wang, A critical review on the heterogeneous catalytic oxidation of elemental mercury in flue gases, *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 10813-10823 (2013).
13. B. Wu, H. Tian, Y. Hao, S. Liu, X. Liu, W. Liu, X. Bai, W. Liang, S. Lin, Y. Wu, P. Shao, H. Liu, and C. Zhu, Effects of wet flue gas desulfurization and wet electrostatic precipitators on emission characteristics of particulate matter and its ionic compositions from four 300 MW level ultralow coal-fired power plants, *Environ. Sci. Technol.*, **52**, 14015-14026 (2018).
14. E. Stamate, C. Irimiea, and M. Salewski, Investigation of NOx reduction by low temperature oxidation using ozone produced by dielectric barrier discharge, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **52**, 05EE03 (2013).
15. R. Ji, J. Wang, W. Xu, X. Liu, T. Zhu, C. Yan, and J. Song, Study on the key factors of NO oxidation using O₃: The oxidation product composition and oxidation selectivity, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **57**, 14440-14447 (2018).
16. Z. Han, T. Zou, J. Wang, J. Dong, Y. Deng, and X. Pan, A novel method for simultaneous removal of NO and SO₂ from marine exhaust gas via *in-situ* combination of ozone oxidation and wet scrubbing absorption, *J. Mater. Sci. Eng.*, **8**, 943 (2020).
17. Z-H. Xu, X. Xiao, Y. Jia, P. Fang, J-H. Huang, H-W. Wu, Z-J. Tang, and D-Y. Chen, Simultaneous removal of SO₂ and NO by O₃ oxidation combined with wet absorption, *ACS Omega*, **5**, 5844-5853 (2020).
18. M. S. Kang, J. Shin, T. U Yu, and J. Hwang, Simultaneous removal of gaseous NOx and SO₂ by gas-phase oxidation with ozone and wet scrubbing with sodium hydroxide, *Chem. Eng. J.*, **381**, 122601 (2020).
19. Z. Han, J. Wang, T. Zou, D. Zhao, C. Gao, J. Dong, and X. Pan, NOx removal from flue gas using an ozone advanced oxidation process with injection of low concentration of ethanol: Performance and mechanism, *Energ. Fuels*, **34**, 2080-2088 (2020).
20. P. Fang, C. Cen, Z. Tang, P. Zhong, D. Chen, and Z. Chen, Simultaneous removal of SO₂ and NOx by wet scrubbing using urea solution, *Chem. Eng. J.*, **168**, 52-59 (2011).
21. T-W. Chien and H. Chu, Removal of SO₂ and NO from flue gas by wet scrubbing using an aqueous NaClO₂ solution, *J. Hazard. Mater.*, **80**, 43-57 (2000).
22. J. Kuroпка, Removal of nitrogen oxides from flue gases in a packed column, *Environ. Prot. Eng.*, **37**, 13-22 (2011).
23. <https://csr.tsmc.com/csr/en/focus/greenManufacturing/airPollutionControl.html>.
24. H-W. Park, W. B. Cha, and S. Uhm, Highly efficient thermal plasma scrubber technology for the treatment of perfluorocompounds (PFCs), *Appl. Chem. Eng.*, **29**, 10-17 (2018).
25. S. Jodpinmai, S. Boonduang, and P. Limsuwan, Dielectric barrier discharge ozone generator using aluminum granules electrodes, *J. Electrostat.*, **74**, 108-114 (2015).

Authors

- Sunghyun Uhm; Ph.D, Principal Research Engineer, Plant Process Development Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin 17180, Korea; elektrik@iae.re.kr
- Gi Hoon Hong; Ph.D, Research Engineer, Plant Process Development Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin 17180, Korea; run1600@iae.re.kr
- Sangyeon Hwang; Ph.D, Senior Research Engineer, Plant Process Development Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin 17180, Korea; syhwang@iae.re.kr