

휘발성 유기 화합물 및 암모니아 직접 연소를 통한 배기가스 특성

김종수¹, 최석천¹, 정수화^{1,*}, 목진성², 김두범²

¹한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부

충청남도 천안시 서북구 입장면 양대기로길 89

²삼성전자

경기도 수원시 영통구 삼성로 129

(2022년 4월 8일 접수; 2022년 4월 27일 수정본 접수; 2022년 5월 9일 채택)

Characteristics of Flue Gas Using Direct Combustion of VOC and Ammonia

JongSu Kim¹, SeukCheun Choi¹, SooHwa Jeong^{1,*}, ChinSung Mock², and DooBoem Kim²

¹Carbon Neutral Technology R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, 89, Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan-si Chungcheongnam-do, Republic of Korea
²Samsung Electronics, 129 Samsung-ro Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

(Received for review April 8, 2022; Revision received April 27, 2022; Accepted May 9, 2022)

요 약

현재 반도체 공정에서 다양한 by-product 및 미사용 가스가 배출되고 있다. 오염물질을 함유한 배기는 일반적으로 유기, 산, 알칼리, 열, 캐비닛 배기 등으로 분류하며, 각각의 배기 특성에 맞는 대기 방지설비에서 처리 후 배출된다. 유기 배기 물질로서 휘발성 유기 화합물(volatile organic compound, VOC)은 산소 함유 탄화수소, 유황 함유 계 탄화수소 및 휘발성 탄화수소를 총칭하는 물질이고, 알칼리 배기의 주요 성분은 암모니아(NH₃), 수산화테트라메틸암모늄(Tetramethylammonium hydroxide, TMAH) 등이 있다. 본 연구의 목적은 유기와 알칼리 배기가스를 동시에 처리하기 위해 직접 연소 및 로 내 온도를 일정하게 유지하여 연소 특성 파악하고 NO_x 저감률을 분석하고자 진행하였다. VOC는 Acetone, IPA(isopropyl alcohol), PGMEA(propylene glycol methyl ether acetate)를 사용하였으며, 알칼리 배기 대표 물질로는 암모니아를 사용하였다. 실험 변수로는 온도와 당량 비(equivalence ratio, ER)로 배기가스 특성을 살펴보았다. 물질별 단독 및 혼합 연소테스트를 진행하였다. VOC 단독 테스트 결과 당량 비 1.4 조건에서 완전 연소가 일어남을 확인하였다. 암모니아는 당량 비 감소에 따라 산소 및 질소산화물의 농도가 감소하였다. 혼합 연소 운전 결과 배기가스 조성 내 질소산화물의 대부분은 일산화질소였으며 이산화질소는 10 ppm 부근으로 검출되었다. 전체적으로 질소산화물의 농도는 반응온도가 증가하면서 산화반응이 활성화되어 감소하는 경향을 나타내지만 이산화탄소의 농도는 증가하는 경향을 확인하였다. 전기열원을 적용한 무 화염 연소 기술을 적용하였을 때 VOC 및 암모니아 연소가 원활하게 일어남으로써 현재 별도로 운전되는 유기 및 알칼리 배기 시스템보다 경제성 및 공간적인 측면에서 장점이 있다고 판단된다.

주제어 : 반도체 공정, 휘발성 유기 화합물, 암모니아, 당량 비, 무 화염연소

Abstract : The semiconductor process currently emits various by-products and unused gases. Emissions containing pollutants are generally classified into categories such as organic, acid, alkali, thermal, and cabinet exhaust. They are discharged after treatment in an atmospheric prevention facility suitable for each exhaust type. The main components of organic exhaust are volatile organic compounds (VOC), which is a generic term for oxygen-containing hydrocarbons, sulfur-containing hydrocarbons, and volatile hydrocarbons, while the main components of alkali exhaust include ammonia and tetramethylammonium hydroxide. The purpose of this study was to determine the combustion characteristics and analyze the NO_x reduction rate by maintaining a direct combustion and temperature to process organic and alkaline exhaust gases simultaneously. Acetone, isopropyl alcohol (IPA), and propylene glycol methyl ether acetate (PGMEA) were used as VOCs and ammonia was used as an alkali exhaust material. Independent and VOC-ammonia mixture combustion tests were conducted for each material. The combustion tests for the VOCs confirmed that complete combustion occurred at an equivalence ratio of 1.4. In the ammonia combustion test, the NO_x

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: pysoo80@kitech.re.kr; Tel: +82-41-589-8666; Fax: +82-41-589-8323

doi: 10.7464/ksct.2022.28.2.131 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

concentration decreased at a lower equivalence ratio. In the co-combustion of VOC and ammonia, NO was dominant in the NO_x emission while NO₂ was detected at approximately 10 ppm. Overall, the concentration of nitrogen oxide decreased due to the activation of the oxidation reaction as the reaction temperature increased. On the other hand, the concentration of carbon dioxide increased. Flameless combustion with an electric heat source achieved successful combustion of VOC and ammonia. This technology is expected to have advantages in cost and compactness compared to existing organic and alkaline treatment systems applied separately.

Keywords : Semiconductor process, Volatile Organic Compound, Ammonia, Equivalence ratio, Flameless combustion

1. 서론

현재 반도체 공정에서 발생하는 다양한 by-product 및 미사용 가스가 배출되고 있으며, 오염물질을 함유한 배기가 발생하여 배기 특성에 맞는 처리장치를 통해 정화 후 대기로 방출하고 있다.

유기배기 물질로서 휘발성 유기 화합물(volatile organic compound, VOC)는 산소 함유계 탄화수소, 유황 함유계 탄화수소 및 휘발성 탄화수소를 총칭하며, 일반적으로 반도체 사업장 옥상 유기배기에서 배출되는 VOC는 축열식 소각설비(Regenerative Thermal Oxidizer, RTO)을 이용하여 열산화하여 처리하고 있으며 운전 및 운영과정에서 총 탄화수소(Total Hydrocarbon, THC)이 배출하여 악취를 유발할 수 있다는 단점을 가지고 있다. RTO는 메탄연소로 불꽃 화염을 만들어 연소로의 온도를 상승하여 질소산화물(NO_x)를 배출할 수 있다. 이를 절감하기 위해 연소로의 일정 온도를 유지할 수 있는 저 NO_x버너, 다단연소, 마일드연소 등의 기술을 적용하고 있다. VOC는 물질 자체로 직접적으로 인체에 유해하고 지방족 탄화수소류의 경우 광화학 반응을 통해 스모그 발생의 원인이 된다[1,2].

알칼리배기는 일반적으로 옥상에서 합류하여 옥상의 중앙 습식 스크리버로 흡수 및 화학적 중화처리하고 있으며, 알칼리배기의 주요 성분은 암모니아(NH₃), TMAH(TetraMethylAmmonium Hydroxide) 등이 있으며 일반적으로 황산(Sulfuric Acid) 약액을 공급하여 습식 스크리버에서 처리하고 있다.

본 연구의 목적은 반도체 설비에서 발생하는 유기성 배기가스와 암모니아를 포함한 알칼리계 가스를 전기열원을 이용한 무 화염연소를 적용하여 동시에 처리하여 연소 특성 및 NO_x 저감을 파악하는데 있다.

무화염 연소는 기존화염이 가지고 있는 국부적인 연소 반응 영역을 확장시켜, 가시적인 화염이 보이지 않으며, 가열로 내부 전체가 일정한 온도분포를 보이는 연소특성을 가지고 있다[3-5]. 이러한 온도 특성으로 인하여 고온의 배가스를 더욱 효율적으로 활용할 수 있고, 가스 연소 시 주로 문제가 되는 thermal NO_x를 저감할 수 있다[6,7].

일반적으로 VOC의 제거 반응은 다음의 two-step으로 주로 대표된다[8].



본 연구에서 사용한 연소 VOC는 Acetone, IPA(Isopropyl

alcohol), PGMEA (Propylene glycol methyl ether acetate) 3종을 사용하였다.

2. 실험 및 분석 방법

2.1. 실험 장치 및 방법

전기열원 기반 무 화염연소 시스템은 크게 원료 투입부, 산화제 투입부, 예열기, SCR 반응기 그리고 냉각시스템으로 구성되어 있다. 연소 시스템의 개략도는 Figure 1에 나타내었다. VOC 원료투입부는 고압정량정밀펌프를 이용하여 액상의 시료를 정량적으로 공급할 수 있게 하였고 원활한 공급을 위하여 Ar을 Carrier가스로 하였다. VOC는 반응기 투입 전 예열기(700 °C) 투입을 통하여 기상으로 전환하여 연소시스템에 투입할 수 있도록 하였고 연소시스템 반응기 투입 전 Swirl을 적용하여 반응기 내부로 투입되는 원료 및 산화제의 원활한 접촉이 발생하도록 하였다. 암모니아는 Gas regulator를 이용하여 일정하게 원료가 공급하도록 구성하였다. 산화제 투입부에서 산화제는 O₂를 사용하였고, 200 °C의 예열기를 거쳐 연소로로 투입된다. 연소로는 직경 151 mm, 높이 500 mm이고 주변 전체를 전기 히터로 가열하여 온도를 제어하므로 연소로 전체가 일정한 온도가 유지되어 무 화염연소를 진행하였다. 연소시스템 후단에는 NO_x를 제거하기 위한 SCR 시스템을 구축하였고 온도는 450 °C를 유지하였다. 배기가스에서 발생하는 수분을 포집하기 위하여 냉각기를 두었다. 매 실험 Carrier gas는 0.6 L min⁻¹ 유량으로 고정하여 실험을 진행하였다. 실험은 반응기 승온 후 온도가 안정화 되었을 때, Carrier gas 및 산화제를 투입하였으며 배기가스의 성분이 안정화되고 20분 정도 유지한 후 실험을 종료하였다. 실험 변수로는 온도와 당량 비(equivalence ratio, ER)로 배기가스 특성을 살펴보았다.

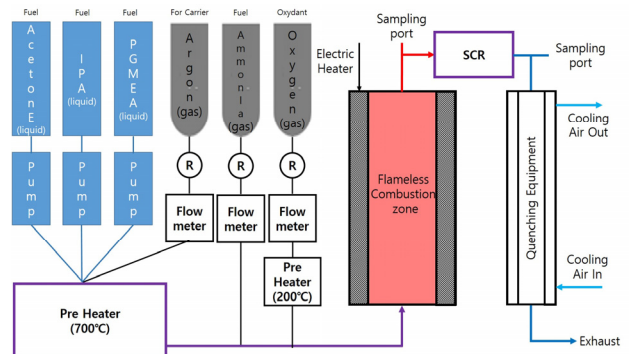


Figure 1. Schematic diagram of Flameless combustion system.

Table 1. Cooper and Alley method.

Chemical	Formular	C	H	O	Chemical	Formular	C	H	O
Acetone	C ₃ H ₆ O	3	6	1	IPA	C ₃ H ₈ O	3	8	1
W1 (#C-atoms)	3	W7 (#S-atoms)	0		W1 (#C-atoms)	3	W7 (#S-atoms)	0	
W2 (Aromatic flag)	0	W8 (H/C ratio)	2.0		W2 (Aromatic flag)	0	W8 (H/C ratio)	2.67	
W3 (C=C double bond flag)	0	W9 (Allyl flag)	0		W3 (C=C double bond flag)	0	W9 (Allyl flag)	0	
W4 (#N-atoms)	0	W10 (C=C-Cl flag)	0		W4 (#N-atoms)	0	W10 (C=C-Cl flag)	0	
W5 (AIT, autoignition temperature)	869	W11 (lnτ)	-0.54		W5 (AIT, autoignition temperature)	750	W11 (lnτ)	-0.46	
W6 (#O-atoms)	1				W6 (#O-atoms)	1			
Chemical	Formular	C	H	O	Chemical	Formular	C	H	O
PGMEA	C ₆ H ₁₂ O ₃	6	12	3	NH ₃	NH ₃	0	3	0
W1 (#C-atoms)	6	W7 (#S-atoms)	0		W1 (#C-atoms)	0	W7 (#S-atoms)	0	
W2 (Aromatic flag)	0	W8 (H/C ratio)	2.0		W2 (Aromatic flag)	0	W8 (H/C ratio)	0	
W3 (C=C double bond flag)	0	W9 (Allyl flag)	0		W3 (C=C double bond flag)	0	W9 (Allyl flag)	0	
W4 (#N-atoms)	0	W10 (C=C-Cl flag)	0		W4 (#N-atoms)	0	W10 (C=C-Cl flag)	0	
W5 (AIT, autoignition temperature)	631	W11 (lnτ)	-0.72		W5 (AIT, autoignition temperature)	1204	W11 (lnτ)	-0.51	
W6 (#O-atoms)	3				W6 (#O-atoms)	0			

당량 비는 원료가 완전 연소 시 필요한 이론적 산화제의 량과 실제 투입된 산화제 비율로 정의할 수 있다.

ER = (원료 대비 산화제 비율) / (원료 대비 산화제 비율)_{st}
 점미사 st는 화학양론적 조건을 나타낸다[9]. Equation (3)

연소 배기가스의 특성은 연소가스 분석기(TESTO-350K)을 통해 관찰하였으며, 암모니아 분석기는 Gas Tiger 2000을 통하여 분석하였다. 연소 후 배기가스의 내부의 잔류 오염물질 농도를 확인하기 위하여 연소로 후단 배관의 배기가스를 Tedlar bag에 포집하여 SIFT-MS(Selected ion flow tube mass spectrometry)로 잔류 오염물질 농도를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 휘발성 유기 화합물, 암모니아 단독 연소

휘발성 유기 화합물 및 암모니아 연소 실험 시 반응온도를 선정하기 위하여 Cooper and Alley method를 이용하여 대상 화합물이 99.9% 연소되는 최소의 온도를 계산하여 실험에 사용하였고 Table 1에 표시하였다.

$$T_{99.9} (^{\circ}\text{F}) = 594 - 12.2W_1 + 117.0W_2 + 71.6W_3 + 80.2W_4 + 0.592W_5 - 20.2W_6 - 420.3W_7 + 87.1W_8 - 66.8W_9 + 62.8W_{10} - 75.3W_{11} \quad [10].$$

Equation (4)

단독 테스트 시 원료의 농도는 20,000 ppm으로 하여 진행하였

Table 2. Reaction conditions of independent combustion test.

Fuel	Minimum temperature(°C) required to destroy 99.9%	ER	Reactor temp(°C)	Residence time(s)
Acetone	685	1.2, 1.4	685, 735, 785, 835	0.19 ~ 0.23
IPA	675	1.2, 1.4	675, 725, 775	0.22 ~ 0.26
PGMEA	572	1.2, 1.4	572, 622, 672, 722	0.18 ~ 0.23
NH ₃	730	0.6, 0.8, 1.0, 1.4	785	0.16 ~ 0.37

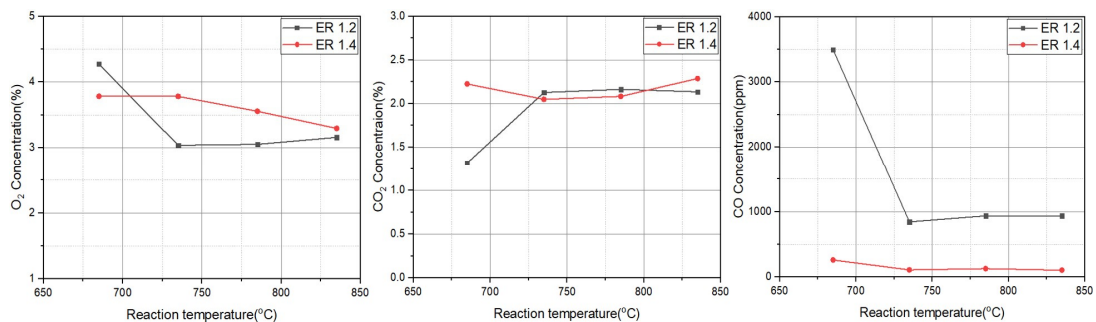


Figure 2. Gas concentration of acetone combustion by ER conditions.

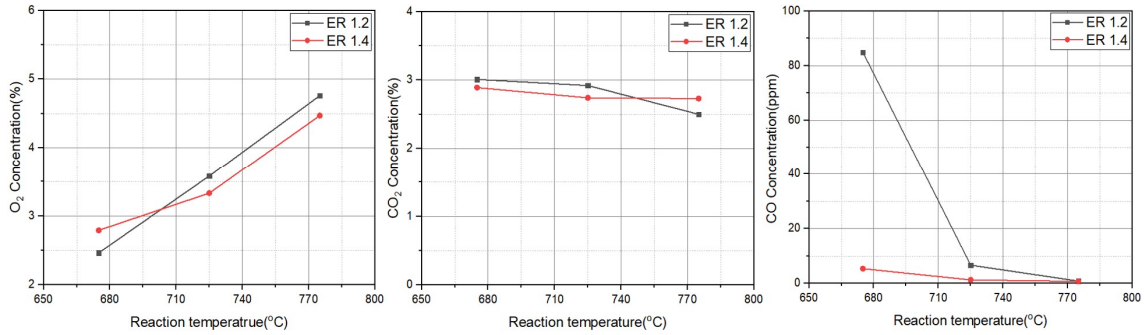


Figure 3. Gas concentration of IPA combustion by ER conditions.

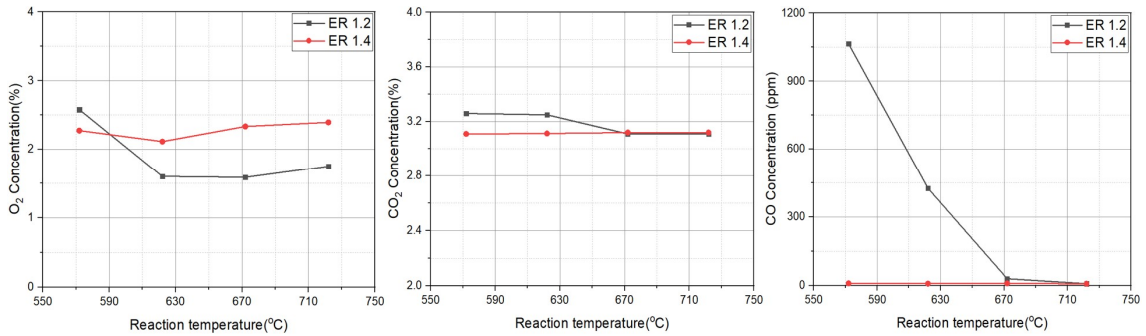


Figure 4. Gas concentration of PGMEA combustion by ER conditions.

고 단독 연소 조건은 Table 2에 나타내었다.

Figure 2에 연소 조건의 따른 Acetone의 연소 배기가스 성분을 표시하였다. 당량 비 1.2에서 일산화탄소 함량 변화를 보면 알 수 있듯이 불완전 연소가 일어남을 확인할 수 있다. 그 외의 온도에서도 일산화탄소의 농도가 1,000 ppm 부근에서 발생하는 것이 확인되어 연소가 활발하게 이루어지지 않는 것으로 판단된다. 당량 비 1.4에서는 당량 비 1.2에 비해 685 °C를 제외한 모든 조건에서 일산화탄소 및 이산화탄소가 거의 유사한 경향을 관찰할 수 있고, 특히 일산화탄소의 경우 반응온도 735 °C 이상에서는 100 ppm 미만으로 완전 연소가 일어나는 것을 보여주고 있다.

Figure 3에 연소 조건의 따른 IPA의 연소 배기가스 성분을 표시하였다. 당량 비 1.2 조건에서 전체적으로 연소가 잘 일어나고 일산화탄소 함량만 보면 최소 연소 조건인 675 °C를 제외한 모든 조건에서 5 ppm 이하로 검출되는 것을 확인하였다. 당량 비 1.4 조건에서도 당량 비 1.2 조건과 비슷하게 완전연소가 이루어지는 것을 확인할 수 있는데 일산화탄소의 경우 675 °C에서도 5 ppm

이하로 유지되는 것으로 보아 당량 비 값이 완전연소에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

PGMEA의 경우 반응기로 연료를 원활하게 투입하기 위하여 예열기의 온도를 700 °C로 설정하여 실험을 진행하였다. 예열기 없이 연소로에 직접 투입 시 타르 및 코크로 생성으로 인하여 배관 막힘 현상이 발생하였다. Figure 4에 연소 조건의 따른 PGMEA 연소 배기가스 성분을 표시하였다. 당량 비 1.2 조건에서는 비교적 낮은 반응온도(572, 622 °C)에서는 일산화탄소 함량이 높은 것으로 보아 불완전 연소가 발생하지만 그 이상의 온도에서는 연소가 잘 이루어지는 것을 확인하였다. 당량 비 1.4의 경우 모든 경우에서 10 ppm 이하의 일산화탄소 농도가 유지되고 이산화탄소의 값이 안정되게 유지되는 것으로 보아 완전연소가 이루어진다고 판단된다.

암모니아 단독 연소 실험 시에는 암모니아 20,000 ppm(Ar Balance)의 혼합가스를 사용하였으며 예열기를 통과하지 않고 반응기에 투입하여 연소실험을 진행하였다. 예열기(700 °C)를 거

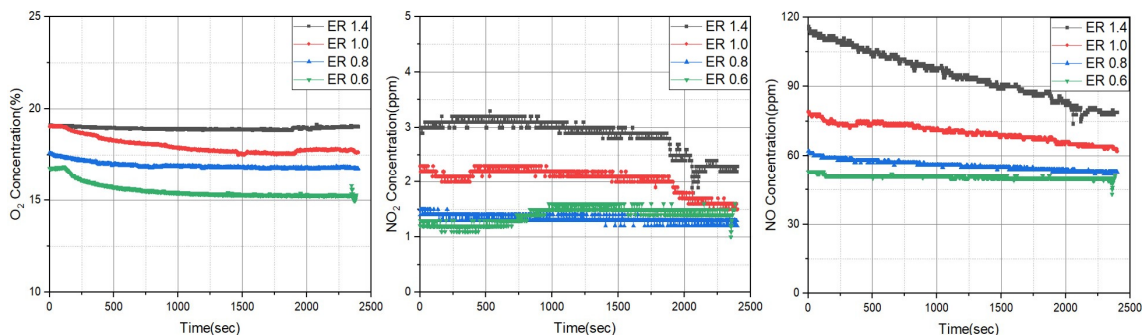


Figure 5. Gas concentration during Ammonia combustion by ER conditions.

Table 3. Reaction conditions of VOC-ammonia mixture combustion test.

ER	0.6	0.8	1.0	1.4
Volume (L) - Flameless combustion zone	8.95			
Feeding rate (L min ⁻¹) - Total VOCs	1.108	0.831	0.665	0.475
Feeding rate (L min ⁻¹) - Carrier gas + Ar base NH ₃	14.903	11.328	9.182	6.73
Feeding rate (L min ⁻¹) - Oxydant	1.14			
Temperature of combustion (°C)	835			
Residence time (sec)	0.141	0.181	0.219	0.287
Combustor Inlet concentration of Acetone (ppm)	12,043	11,897	11,869	11,389
Combustor Inlet concentration of IPA (ppm)	10,863	10,707	10,591	10,346
Combustor Inlet concentration of PGMEA (ppm)	14,248	14,018	13,848	13,476
Combustor Inlet concentration of NH ₃ (ppm)	19,548	19,278	19,014	18,590

치게 되면 암모니아가 일부 열분해 되어 H₂로 변환되고 이로 인하여 연소 폭발 소음이 발생한다. 암모니아의 경우 반응온도를 일정하게 한 후 당량 비 변화에 따른 산화 및 환원 분위기에서 배기가스의 조성을 확인하였고, Figure 5에 표시하였다. 당량 비가 감소함에 따라 즉 환원분위기로 변하면서 산소 및 질소산화물의 농도가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

3.2. 휘발성 유기 화합물 + 암모니아 혼합 연소

혼합 연소 실험의 온도는 모든 휘발성 유기 물질이 완전연소가 되는 835 °C 에서 당량 비 값을 변경하면서 실험을 진행하였다. 당량 비 값은 원료의 양을 변경하면서 조절하였고, 휘발성 유기 화합물과 암모니아의 농도 및 실험 조건은 Table 3에 나타내었다. Figure 6에 당량 비 변화에 따른 휘발성 유기 화합물 + 암모니아의 혼합 연소 가스 성분을 나타내었다. 공기비 감소에 따라 환원분위기로 인하여 산소농도가 감소하고 일산화탄소의 농도는 증가하는 경향을 확인하였다. 질소산화물 역시 공기가 감소함에 따라 일산화질소의 함량이 증가하는 것으로 나타났다.

실제 산업현장에서는 연소기의 반응온도가 낮아질수록 전체 공정의 경제성이 좋아지기 때문에 최저 반응온도를 찾기 위한 실험을 진행하였고 Table 4에 실험조건을 나타내었다. Figure 7에 반응기 온도 변화에 따른 휘발성 유기 화합물 + 암모니아의 혼합

연소 가스 성분을 나타내었다.

실험 결과 일산화탄소는 모든 실험에서 운전 시간 동안 10 ppm 미만으로 검출되는 것을 확인하였다. 반응온도 변화 시 산소 및 일산화탄소의 농도는 크게 변화하지 않았다. 배기가스 조성 내 질소산화물의 대부분은 일산화 질소였으며, 이산화질소는 10 ppm부근에서 유지됨을 확인하였다. 전체적으로 질소산화물의 농도는 반응온도가 증가하면서 산화반응이 활발해짐에 따라 일산화질소 및 이산화질소의 농도는 미량 감소하는 경향을 나타낸 반면 이산화탄소의 농도는 750 °C 이후 미량 증가하는 경향을 확인하였다.

Figure 8에 반응기 후단에서 발생한 잔류 오염물질(휘발성 유기 화합물+암모니아)의 농도를 나타내었다. SIFT-MS 분석 결과 모든 조건에서 잔류 오염물질의 농도는 0.1 ppm미만으로 검출됨을 확인하였다.

본 연구를 통하여 700 °C 와 같이 비교적 저온인 연소조건에서도 휘발성 유기 화합물 + 암모니아 혼합연소가 원활하게 일어남으로서 무 화염연소 기술의 장점이 있다고 판단하였다. 본 실험 장치의 경우 반응기의 작은 용적으로 인하여 반응기 내 배기가스의 체류시간을 맞추기 위하여 미량의 휘발성 유기 화합물(0.1 ~ 0.3 ml min⁻¹)을 투입하여 실험을 진행하였다. 본 실험결과를 Pilot 규모로 진행하기 전에 보다 신뢰성 및 재현성이 있는 데이

Table 4. Secondary reaction conditions of VOC-ammonia mixture combustion test.

ER	1.0				
Volume (L) - Flameless combustion zone	8.95				
Feeding rate (L min ⁻¹) - Total VOCs	0.66				
Feeding rate (L min ⁻¹) - Carrier gas + Ar base NH ₃	9.17				
Feeding rate (L min ⁻¹) - Oxydant	1.14				
Temperature of combustion (°C)	700	725	750	775	790
Residence time (sec)	0.250	0.244	0.237	0.232	0.228
Combustor Inlet concentration of Acetone (ppm)	11,869				
Combustor Inlet concentration of IPA (ppm)	10,591				
Combustor Inlet concentration of PGMEA (ppm)	13,845				
Combustor Inlet concentration of NH ₃ (ppm)	19,014				

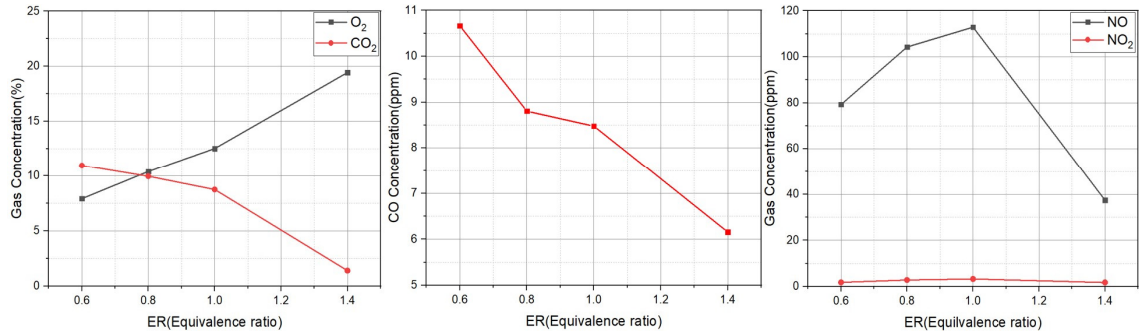


Figure 6. Gas concentration of VOC-ammonia mixture combustion test by ER conditions.

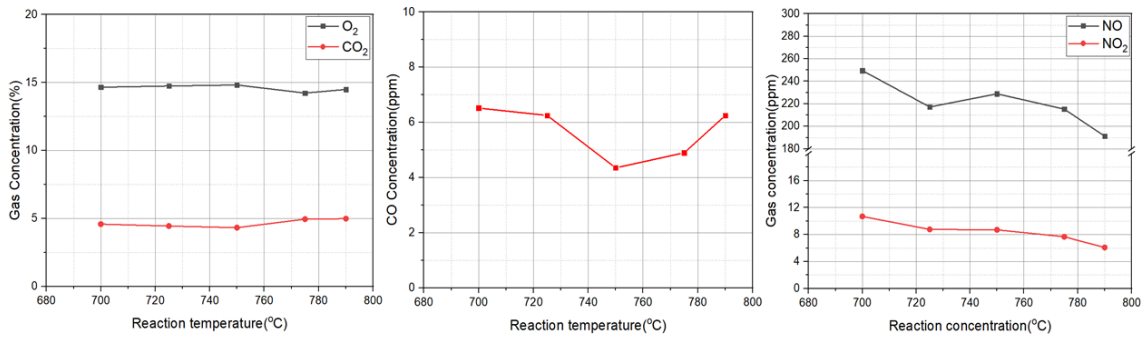


Figure 7. Gas concentration of VOC-ammonia mixture combustion test by reaction temperatures.

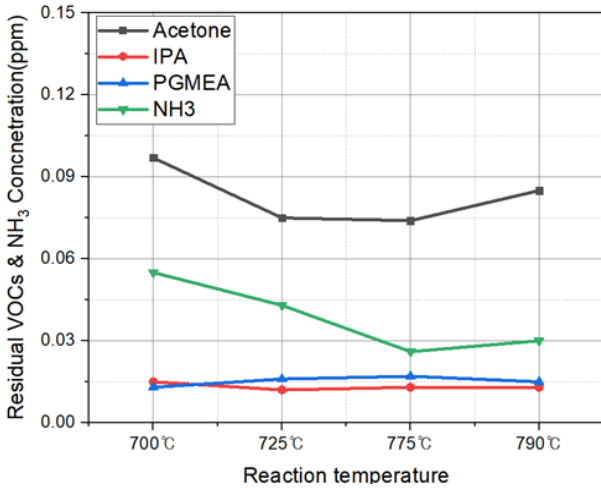


Figure 8. Residual VOCs & Ammonia concentration of VOC-ammonia mixture combustion test by reaction temperatures.

터를 얻기 위해서는 다양한 체류시간 조절 및 많은 양의 휘발성 유기 화합물 투입량이 가능한 Bench 규모(10CMH scale)의 테스트가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 단독 테스트를 통한 휘발성 유기 화합물 및 암모니아를 무 화염연소에 적용하여 연소 특성 및 NO_x 저감에 대한 실험을 수행하였다. 또한 휘발성 유기 화합물 및 암모니아 혼합 연소를 통해 온도 및 공기비 변화에 따른 배기가스 특성 비교 실험도 수행하였다. 이러한 실험들을 통해 얻어진 결

과는 다음과 같다.

- 1) Acetone, IPA, PGMEA 단독 연소 시 반응온도 725 °C 이상에서 완전연소가 일어남을 확인하였다.
- 2) 암모니아 단독 연소 시 반응온도 785 °C에서 반응기 후단에서 암모니아가 발생하지 않아 모든 물질이 연소됨을 확인하였으며 질소산화물의 농도는 당량비가 낮아질수록 감소하는 것을 확인하였다.
- 3) 휘발성 유기 화합물 및 암모니아 혼합 연소 시 반응온도 700 °C와 같이 비교적 저온인 연소조건에서도 연소 제거 효율이 100%에 가깝게 일어남으로서 전기열원을 이용한 무 화염연소 기술이 현재 별도로 운전되는 유기 및 알칼리 배기 시스템의 대안이 될 수 있다고 판단한다.

실제 반도체 공정에 적용하기 전에 본 실험보다 다양한 체류 시간을 조절하여 Bench scale의 테스트를 해서 재현성을 확보한다면 기존 시스템 보다 경제적 및 공간적인 측면에서 장점이 있다고 판단된다.

감사

본 논문은 삼성전자 민간수탁과제 및 한국생산기술연구원 수요기반 공동 실용화 R&D 사업 “통합 VOCs 및 암모니아 직접 연소를 통한 질소산화물 거동 특성 평가(1/1) (kitech IR-21-0007), (kitech UR-21-0002)”과 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 감염우려 의료폐기물 처리 기술 개발 사업(No. 202100335 0010)의 지원으로 수행한 연구입니다.

References

1. Noh, S. Y., Kim, K. H., Choi, J. H., Han, S. D., Kill, I. S., Kim, D. H., and Rhee, Y. W., "Adsorption characteristics of VOCs in activated carbon beds," *J. KOSAE*, **24**(4), 455-469 (2008).
2. Vellingiri, K., Kumar, P. and Kim, K. H., "Coordination polymers: Challenges and future scenarios for capture and degradation of volatile organic compounds," *Nano Res.*, **9**(11), 3181-3208 (2016).
3. Joannon, M. D., Sorrentino, G. and Cavaliere, A., "MILD combustion in diffusion-controlled regimes of hot diluted fuel," *Combust. Flame*, **159**(5), 1832-1839 (2012).
4. Arghode, K. and Gupta, K., "Effect of flow field for colorless distributed combustion(CDC) for gas turbine combustion," *Appl. Energy*, **87**(5), 1631-1640 (2010).
5. Tu, Y., Liu, H., Su, K., Chen, S., Liu, Z., Zheng, C. and Li, W., "Numerical study of H₂O addition effects on pulverized coal oxy-MILD combustion," *Fuel Process. Technol.*, **23**, 252-262 (2015).
6. Wüning, J. A. and Wüning, J. G., "Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **23**(1), 81-94 (1997).
7. Kim D. H., Huh K. Y. and Lee Y. J., "Experimental study of flameless combustion of methane in oxygen-enriched Condition," *J. Korean Soc. Combust.*, **25**(3), 1-10 (2020).
8. Lee et al., "Development of advanced industrial process technology," KIER Report No. KIER-B62404 (2016).
9. Speight, J. G., "Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes Chapter 10 - Combustion of hydrocarbons" *2nd Ed.* 421-463 (2019).
10. Cooper, C. D. and Alley, F. C., "Air Pollution Control: A Design Approach" *Waveland Press., Inc.* (1994).