



Blowing type CGR 적용 저 NO_x 소각시스템 기술 개발 연구

심성훈¹⁾ · 김진태²⁾ · 한소영³⁾ · 노선아⁴⁾*

Development of Low NO_x Incineration System with Blowing Type Combustion Gas Recirculation

Sunghoon Shim¹⁾ · Jintae Kim²⁾ · Soyoung Han³⁾ · Seonah Roh⁴⁾*

Received 11 February 2025 Revised 5 March 2025 Accepted 7 March 2025 Published online 25 March 2025

ABSTRACT Lowering the peak temperature of the flame is known to reduce NO_x emissions during combustion. The mild combustion is a combustion gas recirculation technology that can greatly reduce NO_x. It was confirmed through previous studies that NO_x can be greatly reduced by a combustion gas attraction method using a nozzle. However, in order to solve the maintenance problem of commercial incinerator due to the clinker deposition on the nozzle area, it was necessary to develop an economic system that replaces a plurality of nozzles and minimizes the generation of clinkers. Blowing type recirculation apparatus has been developed for a commercial scale incinerator, in this study. It has been developed a combustion gas recirculation device that is simple and maintain with a single device, and tried to implement a NO_x-reducing incineration system using a blower applicable to the commercialization system.

Key words Municipal wastes incinerator(생활폐기물 소각로), Nitric oxide(질소산화물), Oxygen concentration(산소 농도), High temperature combustion gas recirculation(고온 연소가스 재순환), Low NO_x emission(저 NO_x 배출)

Nomenclature

Ø : diameter
HP : horsepower
mmAq : milli metre Aqua
P : motor poles
ppm : parts per million

Subscript

E.C. : electrochemical
CGR : combustion gas recirculation
NDIR : Non-Dispersive Infrared
NO : nitric oxide
SCR : selective catalytic reduction
SNCR : selective non-catalytic reduction
SUS : stainless steel

1) Researcher Director, Daekyung ESCO

2) Senior Engineer, Korea Institute of Machinery & Materials

3) Principal Engineer, Korea Institute of Machinery & Materials

4) Principal Researcher, Korea Institute of Machinery & Materials

*Corresponding author: sos@kimm.re.kr

Tel: +82-42-868-7930

Fax: +82-42-868-7284

1. 서론

화석연료를 비롯한 폐기물의 연소과정에서 발생하는 대
표적인 공해물질인 질소산화물(NO_x)은연소기 내부의 고온

에 의하여 쉽게 생성되며 일단 생성되고 나면 후처리에 많은 비용과 에너지를 소모하게 된다. 질소 산화물질의 95% 이상이 NO로 구성되어 있으며 대기 방출시 산성비와 같은 생태계 영향과 호흡기에 악영향을 끼치는 문제를 유발할 수 있다.^[1,2] NO_x 처리 공정으로는 SNCR과 SCR과 같은 후처리 공정을 들 수 있는데 대표적인 후처리 공정인 SCR의 경우 재가열에 필요한 에너지 비용과 백금계 등 귀금속을 이용한 촉매의 사용, 환원제의 이용 등으로 높은 비용과 함께 추가적인 에너지를 소모하게 된다.

따라서 연소 과정에서 NO_x를 원천적으로 감소시키는 연소 기술의 개발이 필요하며, 최근 소각로 및 연소로를 중심으로 효율적인 저NO_x연소방식에 대한 관심이 높아지고 있다. 대표적인 NO_x 저감 연소기술로는 MILD(Moderate and Intense Low oxygen Dilution)연소방식과 같은 기술이 적용되고 있으며 이 기술은 후단부의 비활성 연소가스를 연소로내에 재순환하여 연소반응 영역을 확장하고 공기 연소의 화염 최고온도를 낮추는 효과를 통하여 고온의 화염대에서 형성되는 NO_x를 획기적으로 저감할 수 있는 연소방식이다.^[3~6] 이 연소방식을 통하여 연소로내 고온에서 산화제인 공기와 재순환 연소가스의 희석으로 공해물질 생성 저감과 함께 연소가스를 고온으로 재순환할 경우 주입 산화가스의 온도를 향상시켜 연소로의 전체적인 온도 상승을 통한 열효율 향상이 가능하다. 이 방식은 무염산화(Flameless Oxidation), HiTAC(High Temperature Air Combustion) 등으로 불리기도 한다.

선행 연구에서는 고온 연소가스의 재순환(HTFGR, High Temperature Flue Gas Recirculation)을 위하여 고온의 연소가스를 흡인하여 연소용 공기와 혼합할 수 있는 공기

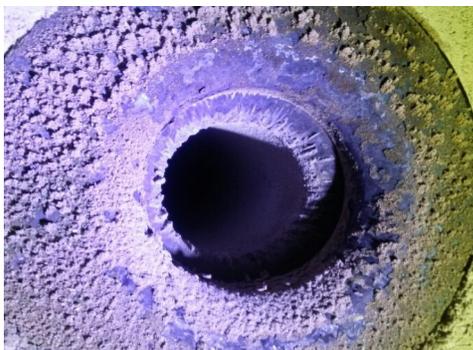


Fig. 1. Dust deposition at the inlet of Coanda nozzle for attracting combustion gas

노즐과 벤투리관의 조합 방식이나 이젝터(Ejector)나 코안다노즐(Coanda nozzle)을 이용한 방식을 적용하여 상용화에 성공한바 있다.^[4~7] 다만 노즐을 이용하는 방식은 유인노즐부에 아래의 Fig. 1에서와 같이 분진이 침착되어 노즐의 연소가스 유인효율이 저하되는 문제로 인해 소각조건에 따라 크링커 제거를 위하여 3개월~6개월마다 정비와 세정작업이 필요하게 된다.

또한, 코안다 노즐은 한 소각로에 여러개(7.2 ton/hr급의 경우 8개)가 필요하므로 이에 따른 부대 배관이나, 설치공수와 정비공수까지 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 단일 장치로 청소와 정비가 간단한 연소가스 재순환장치를 개발하고자 하였으며 상용화 시스템에 적용이 가능한 Blowing type CGR을 적용하여 NO_x 저감 소각시스템을 구현하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 다수개의 코안다노즐 대신 1개의 고온용 CGR송풍기를 이용하여 고온의 연소가스를 유인하여 공기와 혼합함으로써 Blower에 열손상을 입히지 않고 MILD연소효과에 의한 NO_x저감효과를 확인하고자 하였다. 자세한 장치 사양과 실험 방법은 선행 연구를 통하여 확인할 수 있다.^[6] 같은 실험 조건에서 코안다 노즐이 아닌 Blower를 사용하여 실험을 수행하였다.

2.1 절 실험장치

Fig. 2에는 고온용 CGR송풍기를 사용한 실험용 저NO_x

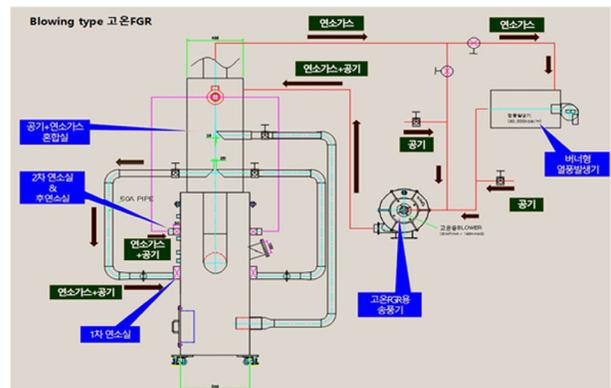


Fig. 2. Low NO_x incineration system configuration diagram

소각시스템의 구성도를 나타내었다. 먼저 Impeller 변형 방지 및 내구성 향상, 베어링 냉각장치, 모터로의 열전달 차단장치 등으로 구성된 고온용 CGR송풍기를 이용하여 고온의 연소가스를 유인하여 공기와 혼합함으로써 Blower에 열손상을 입히지 않고 MILD연소효과에 의한 NOx저감효과를 확인하고자 하였다.

소각 실험로는 케스터블 내화물로 시공되었으며, 측부에 1차 공기와 2차 공기 및 후연소 공기노즐이 배치되어 있으며 1차연소실의 하부에는 바닥에서 공기를 공급할 수 있도록 하였다. 2차 연소실의 상부에는 CGR용 Blower에 의해 유인된 연소용 공기와 고온의 연소가스가 균일하게 혼합되어 각 공기 노즐군으로 배분되도록 하였다.

연돌입구부(2차 연소실 출구부)와 혼합 배분실에 가스샘플링 배관을 설치하여 시료가스를 샘플링하여 그 조성을 분석하도록 하였다. 또한 그림에서와 같이 CGR송풍기를 이용하여 연돌 입구부에서 고온의 연소가스를 유인하는 배관과 외기유입을 조절하는 배관이 있으며, 연돌의 하류부에서는 저온의 연소가스를 유인하여 역시 외기와 혼합하여 열풍로로 유입하도록 되어 있는 배관이 설치되어 있다. 각각의 배관에는 개도조절 댐퍼가 있어 필요에 따라 별도로 고온연소가스 유인라인만 이용하거나, 저온연소가스 유인라인만 이용할 수 있도록 되어 있다.

열풍로에서는 연소가스를 유인하지 않고 열풍로 버너의 가동과 공기의 유인으로 연소에 이용하는 혼합기의 산소농도와 온도를 조절할 수 있도록 하였다. 혼합가스의 가열과 산소농도의 조절을 위한 열풍로 버너는 도시가스 버너를 적용하였으며, 산소농도가 낮아진 버너의 고온 배기가스와 공기를 혼합하여 CGR용 Blower가 수용할 수 있는 온도로 조절하여 각 연소용 공기노즐군으로 배분하게 하였다. 열풍로에 설치된 버너는 별도의 제어반에 의해 설정된 온도로 제어된다.

CGR용 Blower는 인버터(Inverter)에 의해 회전수를 제어할 수 있다. 또한 소각실험로에는 연료인 SRF의 공급을 위해 진동식 피더를 설치하였으며, 공압 실린더와 푸셔(Pusher)를 이용하여 SRF연료 연소잔재를 이송할 수 있도록 하였다. 진동식피더의 SRF연료의 공급량은 진동 주파수와 진폭의 조절에 의해 조절되며, 마찬가지로 설치된 푸셔의 공압 실린더는 위치 센서에 의해 스트로크(Stroke)를

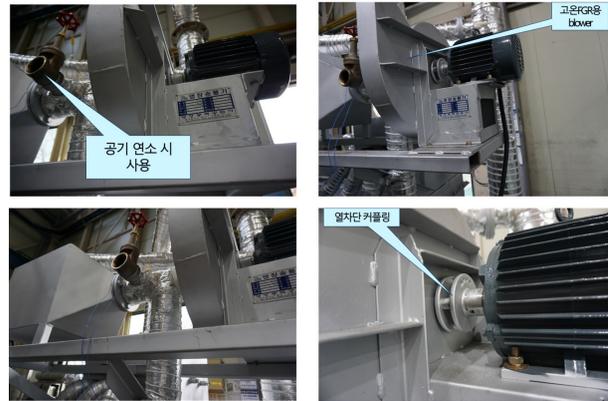


Fig. 3. CGR blower

조절할 수 있으며 제어반에 설치된 작동시간 조절장치에 의해 작동주기를 조절할 수 있다. Fig. 3에는 고온 연소가스의 유인을 위한 CGR용 Blower의 사진을 게재하였다. 송풍기는 연소가스의 고온이 전동기에 전달되지 않도록 열차단 커플링을 적용하였다.

본 연구에 사용된 CGR용 Blower의 제원은 다음과 같다.

- 풍량 및 풍압 : 3 Nm³/min × 150 mmAq
- 형태 : TURBO Type
- 전동기(motor) : 2HP × 4P × 3상
- CASING 재질 : SUS304×3t
- 날개(impeller)재질 : SUS304×3t
- Shaft 연결방식 : Flange COUPLING 직결방식
- 입·출구경 : Ø75, Flange 연결방식

2.2 절 실험방법

실험에 이용된 SRF의 성분은 다음 Table 1과 같다.

Table 1. SRF analysis

SRF	C	H	N	O	S	Cl	ash
	74.6	11.8	7.6	0	0	0	6.1
Heating value (kcal/kg)				9,142			

SRF는 Carbon 성분이 75% 수준으로 원소 분석 비율의 대부분을 차지하고 있으며 Cl 이나 S 성분은 0으로 나타났다. SRF는 시간당 10 kg 투입되었다.

2.2.1 열충격 시험

CGR송풍기의 입구에는 유입온도를 설정온도로 제어하기 위한 버너가 장착된 열풍로를 설치하였다. 열풍로의 출구부 즉, CGR송풍기의 입구온도와 하한온도를 설정하게 되면 버너가 자동적으로 ON/OFF되면서 설정된 온도구간을 주기적으로 반복하게 된다. 본 연구에서는 CGR송풍기의 열에 의한 변형 여부를 확인하기 위하여 실제 사용온도보다 높은 580°C를 상한온도, 250°C를 하한온도로 Setting하여 온도를 급변하게 하는 일종의 열충격 시험을 수행하였다. 시험 시간은 1일 2~4시간씩 10일을 반복하여 총 34시간 시험하였으며 소각 운전 시험까지 총 80시간을 운전하였다.

2.2.2 배가스 재순환 및 가스 분석

배기가스 중의 NO_x, CO, O₂ 및 CO₂ 농도의 측정은 Fig. 4의 독일 VarioPlus Ind. MRU Emission Monitoring System을 이용하였으며 측정 센서의 종류와 오차범위는 다음과 같다.^[6]

- O₂ (E.C) : 0-21%/0.01%
- CO₂ (NDIR) : 0-20%/0.1%
- CO (E.C) : 0-10,000 ppm/1 ppm
- CO (NDIR) : 0-10%/0.001%
- NO (E.C) : 0-5,000 ppm/1 ppm
- NO₂ (E.C) : 0-1,000 ppm/1 ppm
- ※ 오차 범위 : Reading값의 ±2% 이내



Fig. 4. VarioPlus analyzer

본 기기는 CO₂에 대해 연료의 종류와 측정된 산소 농도에 의한 계산치가 아닌 NDIR센서에 의한 직접 측정치를 제공한다. 온도는 일본 GRAPHTEC Corp. Graphic Data Logger(midi), type GL450으로 기록하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 CGR송풍기 내열성 확인

Fig. 5는 CGR송풍기의 유입부 온도변화를 실측한 값을 보여주고 있다. Setting 온도에 대해 다소 높거나 낮아지는 Overshoot는 있으나 설정온도를 기준으로 주기적으로 반복되는 온도 상태를 보여주고 있음을 알 수 있다.

본 실험에서는 CGR송풍기의 Casing 및 Impeller가 이러한 반복적인 온도의 급변에 대하여 변형 등의 영향 여부에 대한 조사를 실시한 것이다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 온도 급변상황의 반복조건에서도 CGR송풍기의 Casing 및 Impeller는 변형 없이 온전한 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 고온의 연소가스 유입수단이 코안다 노즐을 대체하여 송풍기로 가능함을 시사한다.

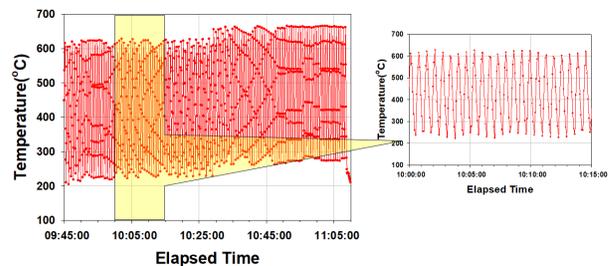


Fig. 5. Temperature change in inlet of CGR blower



Fig. 6. Blower casing and impeller for CGR after temperature change test

3.2 CGR송풍기 적용 소각 실험

3.2.1 배기가스 농도 분석 결과

본 연구에서는 CGR 송풍기를 이용한 경우를 기존의 공기 소각과 비교하였다. Fig. 7의 좌측그림은 공기만을 이용한 소각 시의 화염상태를 우측은 CGR송풍기를 적용하여 고온의 연소가스를 공기와 혼합하여 소각한 경우의 화염상태를 촬영한 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 좌측의 공기 소각 시의 화염은 보다 밝은 상태이며 고온부와 저온부의 색온도 차이가 확연하게 보이는 전형적인 기존의 소각화염을 보여주고 있다. 반면, 우측의 CGR소각 시의 화염은 전반적으로 공기 소각 시의 화염보다 어둡고 전반적으로 색온도 차이가 줄어든 균일한 명암 상태를 보인다. 이는 CGR로 인해 연소가스가 공기에 혼합됨으로써 산소의 농도가 15~16%로 감소하고 전체적으로 균일한 온도가 형성되어 NO_x 저감조건을 보이는 것이다.^[7,8]

Fig. 8에는 공기만의 소각에서와 CGR소각 시의 NO_x 및 O₂의 농도 변화를 그래프로 도시한 결과이다.

이 결과에서 보는 바와 같이 공기 소각 시에는 NO_x 평균



Fig. 7. Flames conditions at air incineration (left) & CGR incineration (right)

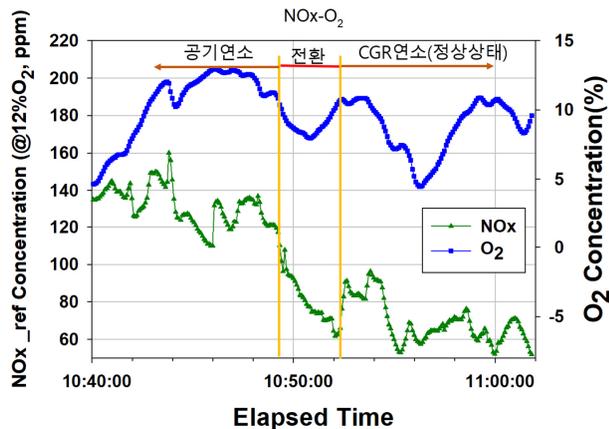


Fig. 8. Changes in NO_x-O₂ concentration during air incineration and CGR incineration

값이 기준산소농도 12%로 환산한 경우 132 ppm이었으나 CGR소각으로 전환한 후에 안정된 상태에서의 평균값은 69 ppm(산소 농도 12% 기준)으로 47.5% 저감되었다. 평균산소농도는 공기 소각 시에 10.4%에서 CGR 소각 시에 8.7%로 산소농도가 낮은 상태에서 소각이 이루어졌음을 알 수 있다.

Fig. 9에는 공기만의 소각에서와 CGR소각 시의 CO의 농도 변화를 그래프로 도시한 결과이다. CO의 농도는 산소 농도의 저하에 따라 최대 100 ppm 수준까지 증가하였으나 평균농도는 공기 소각 시의 평균 40 ppm에서 CGR소각 시에 67 ppm으로 소량 상승하였으며 소형의 실험 소각로임을 감안하면 우려할 만한 증가는 아닌 것으로 판단된다.

CO의 생성은 온도 조건과 로내 체류시간에 크게 의존하므로 실제 상용 소각로에서는 충분히 CO를 더 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 상기 결과에서 코안다노즐을 CGR송풍기로 대체한 소각에서 충분히 저NO_x 연소가 가능함을 확인할 수 있었다.

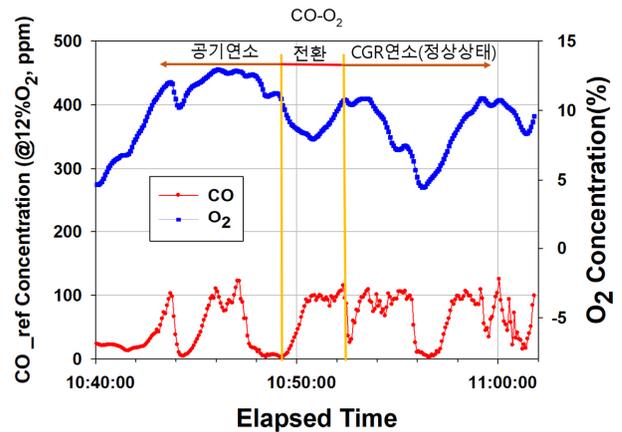


Fig. 9. Changes in CO-O₂ concentration during air incineration and CGR incineration

4. 결론

본 연구에서는 기존의 노즐 타입의 연소가스 재순환 장치를 대체하는 Blowing type의 연소가스 재순환 장치를 이용하여 그 특성을 살펴보았다. 먼저 Blower를 이용하여 열에 대한 내구성을 살펴보고자 열충격 시험을 수행한 결과 고온에서 Blower의 안정성을 확인하여 Blowing type

CGR 연소에 대한 상용화 시스템 가능성을 확인하였다. 다음으로 배기가스의 농도를 살펴보고 NO_x 저감 효율을 살펴보았다. 노즐을 이용할 때와 같이 일반적인 공기 소각 시에는 NO_x 평균값이 기준산소농도 12%로 환산한 경우 132 ppm이었으나 CGR소각으로 전환한 후에 안정된 상태에서 평균값은 69 ppm(기준산소농도 12%)으로 47.5% 저감되었고 CO의 평균농도는 공기 소각 시의 평균 40 ppm에서 CGR소각 시에 67 ppm으로 소량 상승하는 것으로 나타났다. NO_x 및 O₂의 농도는 안정적으로 배출되는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국기계연구원의 기본 사업인 “Blowing type CGR 적용 저 NO_x/clinker 소각시스템 상용화기술 개발”(NK252K) 및 “Waste plastic 이용 고부가 Carbon 생산 기술 개발”(NK251F) 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Shin, D., Lee, H., Kim, J., and Jo, J., 2024, “Computational analysis of nitrogen oxides reduction in exhaust gas from livestock manure solid fuel using urea-based selective non-catalytic Rrduction”, *New. Renew. Energy*, **20**(3), 1-11.
- [2] Wünnig, J.A., and Wünnig, J.G., 1997, “Flameless oxidation to reduce thermal no-formation”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **23**(1), 81-94.
- [3] Michael, F., 2001, “Low NO_x combustion technologies for high temperature application”, *Energy Convers. Manag.* **42**(15-17), 1919-1935.
- [4] Shim, S.H., and Jeong, S.H., 2016, “Characteristics of exhaust gas in a commercial scale municipal wastes incinerator with high temperature combustion gas recirculation”, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **33**(6), 565-572.
- [5] Shim, S.H., and Jeong, S.H., 2012, “High temperature exhaust recirculation for low NO_x emission in a recycled solid fuel MILD combustion”, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **29**(4), 398-403.
- [6] Shim, S.H., Jeong, S.H., and Ha, J.S., 2013, “High temperature exhaust recirculation for low NO_x emission in solid fuel MILD combustion in pilot-scale combustion rurnace”, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **30**(1), 21-27.
- [7] Ha, J.S., Shim, S.H., and Jeong, E.H., 2014, “A study on the flow characteristics in a MILD combustion waste incinerator with the change of flue gas recirculation inlet location”, *J. Energy Eng.*, **23**(3), 51-57.
- [8] Shim, S.H., 2014, “Combustion characteristics and analyzing results of exhaust gas of solid fuel with measuring position in a pilot scale MILD combustor using high temperature exhaust gas recirculation”, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **31**(1), 89-95.
- [9] Shim, S.H., Jeong, S.H., and Lee, S.S., 2015, “Low nitrogen oxides combustion of dried sludge using a pilot-scale cyclone combustor with recirculation”, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, **65**(4), 413-422.