

외부가진 오일 버너의 고효율 저 NOx 배출특성

Emission Characteristic for High Efficiency and Low NOx of Externally Oscillated Oil Burner

김 성 천 · 송 형 운 · 전 영 남*
BK21바이오가스 기반 수소생산 사업팀
조선대학교 공과대학 환경공학부
(2006년 3월 3일 접수, 2006년 6월 29일 채택)

Seong-Cheon Kim, Hyoung-Woon Song and Young-Nam Chun*
BK21 Team for Hydrogen Production
Department of Environmental Engineering, Chosun University
(Received 3 March 2006, accepted 29 June 2006)

Abstract

The important factor for the development of burner is the achievement of low emissions with maintaining combustibility. In case of maintaining high temperature flame and excess air to increase the combustibility, it is possible to achieve high combustion efficiency, due to the reduction of UHC (unburn hydrocarbon), carbon monoxide and soot. However, it is difficult to reduce the thermal NOx produced in the high temperature flame.

To solve this problem, we developed externally oscillated oil burner which is possible for the high efficiency combustion and low NOx emission, simultaneously. The experiment of flame characteristics and NOx reduction were achieved according to the variation of frequency, amplitude and air velocity.

Frequency, amplitude and air velocity are the most important parameter. The optimum operating conditions are frequency 1,900 Hz, amplitude $3 V_{pp}$, and air velocity 6.8 m/s. Reduction of NOx and CO are 47% and 22%, respectively.

Key words : External oscillation, Low emission oil burner, Combustibility, NOx

1. 서 론

현재 많은 열 설비에서 경유나 중유와 같은 액체 연료를 연소하는데 질소산화물과 분진 같은 오염물질의 발생량은 상대적으로 가스 연료보다 높아 환경

오염의 문제로 규제가 점점 심화되고 있다. 특히 환경부에서는 발생 질소산화물량에 비례하여 공해 부담금을 부과하는 제도를 준비하고 있는 현실에서 질소산화물 저감은 업체의 비용 절감과 환경오염의 감소 차원에서 시급하다.

질소산화물의 생성은 크게 thermal NOx와 fuel NOx로 구별되는데, 이중 thermal NOx의 생성은 넓은 범위의 공기비에 걸쳐 높은 고온 화염에서 생성

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)62-230-7156, E-mail : ynchun@chosun.ac.kr

되기 때문에 많은 실험적, 이론적 연구의 대상이 되고 있다. 현재 일반적인 질소산화물 저감 대책으로 알려진 방법은 크게 연소 개선 방법과 배연 탈질방법으로 구분된다. 중대형급 이상 규모의 보일러 및 기타 연소 시스템의 경우 선택적 촉매 환원법 및 비선택적 촉매 환원법과 같은 배연탈질에 의한 질소산화물 배출제어 연구(이인영 등, 2001; Cho, 1994)가 많이 시도되고 있으나, 연소 개선 방법에 의한 질소산화물 제어가 충분히 이루어질 경우 이러한 후처리 장치에 관한 비용 절감을 이룰 수 있다는 경제적 측면에서 연소 개선 방법이 배연탈질에 의한 배기가스 제어에 있어서 보다 근본적이고 효과적인 방법이 될 수 있다.

이러한 연소 개선 방법에 의한 질소산화물 제어 기술들 중 저 NOx 버너 기술은 가장 널리 사용되는 NOx 제어 기술 중의 하나이다. 하지만 NOx 저감 효율이 증가함에 따라 미연탄화수소와 CO 배출량의 증가와 함께 연소효율이 저하되는 문제점을 가지고 있다. 따라서 화염의 안정성(Douglas and Ayo, 1995)과 연소효율에 영향을 미치는 미연분 발생의 제어와 NOx를 동시에 제어 가능한 기술의 개발이 필요하다.

이러한 문제점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 외부가진 기술을 적용하고자 한다. 외부가진에 대한 기존의 연구는 대부분 음향 장치를 통해 외부의 음파를 유동장에 가진하여 음향학과 레일라이의 기준

(Rayleigh's criterion)(Cadou *et al.*, 1998)에 따른 연소의 안정성에 대한 연구이다(Gutmark *et al.*, 1996). 즉, 스피커를 사용하여 외부가진을 주어 연소 불안정성을 억누르는 능동제어에 대한 많은 연구가 수행되어 오고 있다(Chun and Shin, 2004). 화염 중에 열 음향학적 진동(thermo-acoustic oscillation)을 가하면 정상상태의 화염보다 열, 질량, 운동량의 전달이 촉진되어 화염의 안정성과 연소성이 증진 되는 것으로 알려져 있다. 그러나 외부 가진의 경우 주로 가스연료 연소용 버너에서 화염의 안정성에 대한 연구가 진행되어 경유와 같은 액상 연료를 사용하는 버너 등에 관한 연구는 상대적으로 미흡하다.

본 연구에서는 고효율 연소성과 NOx 저감이 가능한 외부가진 기술을 적용한 저 NOx 오일 버너를 개발하고자 한다. 이를 위해 화염의 안정성 및 연소성과 NOx 저감에 영향을 미치는 가진 주파수, 가진 전압 및 공기 유속 변화에 대해 실험적 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

그림 1은 본 실험에서 사용한 실험 장치를 나타낸 것이다. 실험 장치는 외부가진 버너, 연료공급라인, 측정 및 분석라인, 배출가스 출구(chimney)로 구성

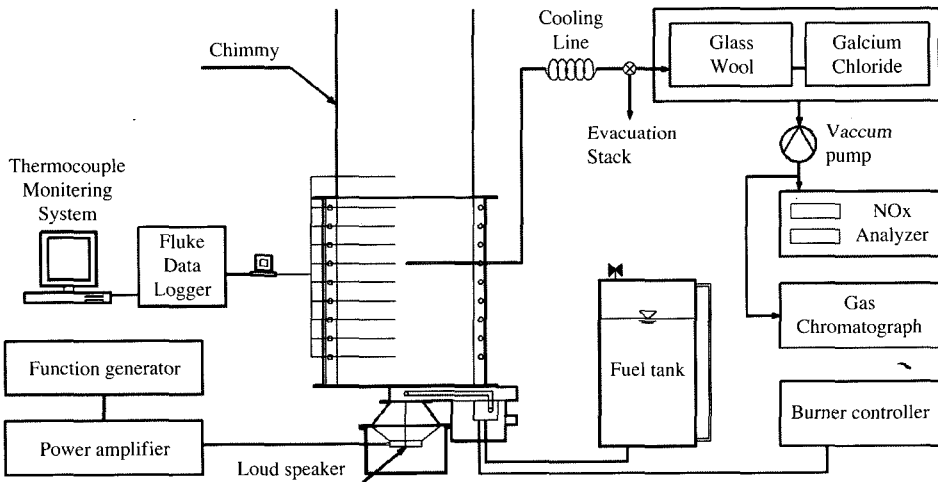


Fig. 1. Schematic diagram of test rig.

되어 있다.

외부가진 버너는 hallow type 연료 분사 노즐과 연료와 연소공기의 혼합을 최적화하기 위한 버너팁이 장착된 비예혼합 버너, 연료와 연소공기 주입 및 점화기(igniter)의 점화시기를 결정하는 버너 조절기, 연소공기를 가진하기 위한 버너 하단 부에 가진 스피커(loud speaker)가 장착되어 있다. 또한 스피커의 음파손실을 최소화하기 위하여 원뿔 형태의 캡으로 버너와 연결하였으며, 외부가진은 주파수 발생기(Agilent tech-33250A)와 파워앰프(JPA-120)에 의해 공급된다.

연료 공급라인은 분사노즐에서 연료 무화가 최적화되도록 연료 펌프 압력은 3kg/cm²로 고정된 연료 펌프와 연료탱크로 구성되어 있다.

측정 및 분석라인은 연소가스 측정과 온도측정 라인으로 구분된다. 연소가스 측정 라인은 시료채취기구(sampling probe & line), 분석장비인 비분산적외선 분석기(California analytical inst-ZRF)와 가스크로마토그래피(Shimazu-14B)로 구성되어 있다. 온도측정 라인은 열전대와 데이터 분석장치(Fluke Data Logger)로 구성되어 있다.

배출가스 출구(chimney)는 외부공기의 유입에 따른 버너 연소 시에 영향을 제거하기 위해 침니의 높이를 충분히 유지한 원통형으로 제작되었으며 축열과 열손실을 방지하기 위해 내화재로 쌓여있다. 연소가스와 온도의 측정을 위해 측정포트가 10곳에 설치되어 있으며, 측정포트 간격은 5cm이다.

2.2 실험방법

실험은 버너로 연소공기를 주입하여 충분히 퍼징(purging)한 후에 점화기를 작동하고 연료분사 노즐에서 연료를 분사하여 연소 실험을 시작하였다. 화염의 안정성과 연소성을 확인하기 위하여 버너팁으로부터 화염후류 방향으로 30cm 지점에서 연소 온도를 연속적으로 모니터링 하였다. 그림 2는 버너의 초기 시동 시 온도 특성을 나타낸 것으로 약 800°C로 화염이 안정된 상태에서 버너 내부를 외부 가진하면서 실험을 진행하였다.

외부가진을 위한 주파수 공급은 주파수 발생기(Agilent tech-33250A)에서 주파수(Hz)와 전압(V_{pp})을 조절한 다음 파워앰프(JPA-120)로 공급하고 파워앰프를 통과한 음은 라우드 스피커(120 W)로 공

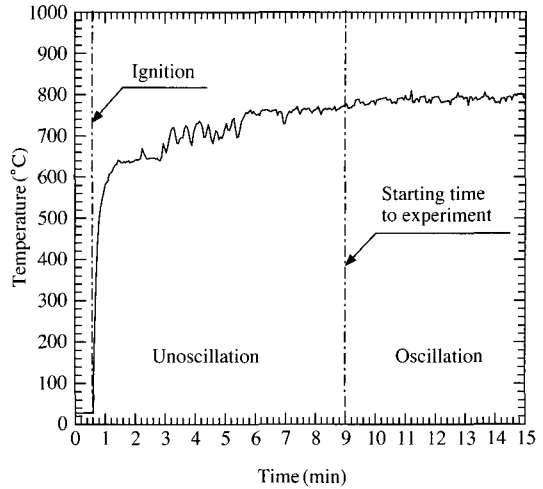


Fig. 2. Intial operating characteristic of the externally oscillated oil burner.

Table 1. Experimental conditions of reference flame and parameter studies.

Conditions	Flame type	Frequency (Hz)	Voltage (V _{pp}) [*]	Air velocity (m/s)
Reference flame	Case R	1,900	3	6.8
Variation of frequency	Case 1	100~3,000	3	6.8
Variation of voltage	Case 2	1,900	1~9	6.8
Variation of air velocity	Case 3	1,900	3	5.1~9.2

^{*}pp : peak to peak

급되어 버너로 음파를 공급하였다.

측정 및 분석은 측정포트(measuring port)에서 시료채취기구(sampling probe & line)를 이용하여 시료를 채취한다. 채취된 시료는 각각 먼지 제거기와 냉각장치를 통과하여 유량계에서 일정 유량(0.5 L/min)으로 조절되어 측정 장치로 유입된다. 본 연구에서는 NO, CO, O₂, 및 온도를 측정하였으며, NO와 CO는 연속적으로 시료가 공급되는데 측정 장치는 비분산적외선분석기(California analytical inst-ZRF)에서 측정하였으며, O₂는 가스크로마토그래피(Shimazu-14B)를 이용하여 측정하였다. 온도는 K-type의 열전대를 제작하여 측정하였으며 측정 장치(Fluke data logger)를 이용하여 실시간으로 모니터링 하였다.

연료는 시중에 판매되는 경유를 사용하였으며, 주 성분은 C(87.74%), H(12.06%), N(0.16%), S(0.004%)로 구성되어 있다(Kim *et al.*, 2003). 연소 조건으로 공기량은 30.8 m³/h이며, 연료량은 1.44 kg/h이다.

실험은 연료량은 1.44 kg/h로 고정된 상태에서 기준화염(Case R)과 가진 주파수(Case 1), 가진 전압(Case 2), 공기 유속(Case 3) 변화에 대한 변수별 연구를 수행하였으며, 각각의 경우에 대한 실험조건은 표 1과 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기준화염의 특성

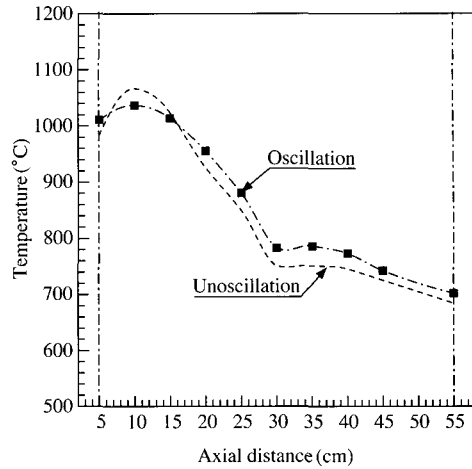
본 실험에서 가진 시 질소산화물의 저감이 가장 좋은 조건을 기준화염(reference flame)으로 선택하여 실험하였으며, 실험조건은 표 1의 Case R과 같다.

그림 3은 가진과 비가진시의 축방향 온도, NO, CO 농도를 비교한 것이다.

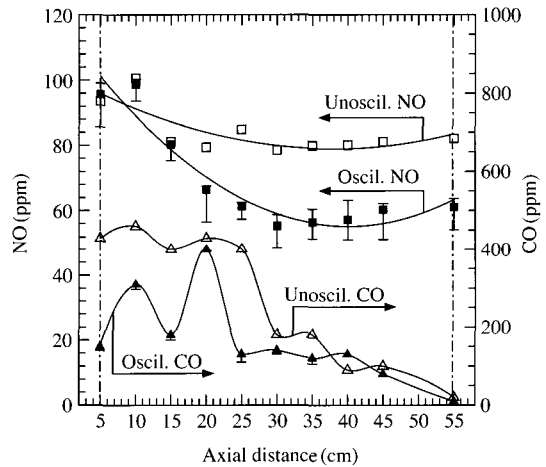
그림 3(a)는 축방향의 온도를 비교한 것으로 가진의 경우 음향학적 에너지가 연료 액적과 연소공기의 유동에 전달되어 화염이 중심부로 집중되는 것을 감소시켜 화염 중심부분의 온도를 낮추므로 버너 전단부에 온도가 비가진시보다 낮지만 무화된 연료 액적과 연소공기의 혼합강화로 전체적으로 연소성이 향상되어 온도 분포가 비가진시에 비해 높게 유지된다.

그림 3(b)는 축방향의 NO와 CO 농도를 비교한 것으로 버너 전단부에서는 NO 농도는 가진과 비가진 시가 거의 유사한 분포를 보이는 반면 화염 후단부로 갈수록 가진에 의한 NO의 저감 효과가 확연하게 나타나고 있다. 이는 전체적으로 가진 시가 혼합이 빨리 이루어져 그림 3(a)에서 보는 것처럼 높은 연소성을 유지하므로 연소가 일찍 종결되어 최대 화염에서 연소가스의 체류시간이 단축되므로 전체적으로 NO 농도가 저감된다. CO 농도는 가진 시가 비가진 시에 비해 전체적으로 농도가 낮게 나타나고 있다. 이는 버너 선단에서 외부가진을 줌에 따라 혼합효과 증진으로 인해 연소성이 향상되어 불완전연소 생성물인 CO가 전체적으로 감소하는 것이다. 비가진 시의 경우에는 혼합효과가 크지 못하므로 CO의 변화폭이 크게 나타나고 있다.

결과적으로 외부가진의 경우 NO_x 저감과 동시에



(a) Gas temperature



(b) NO and CO concentration

Fig. 3. Comparison of oscillation and unoscillation case for the temperature, NO and CO concentrations.

높은 연소성의 유지가 가능한 것을 기준화염의 연구에서 알 수 있었으며, 그 저감 메커니즘은 다음과 같이 설명될 수 있다. 버너의 화염 내로 외부가진이 가해지면 비가진의 화염보다 열, 질량, 운동량의 전달이 촉진되어 연소성을 향상시킬 수 있다. 또한, 화염 내 국부적인 최대 화염온도 영역이 감소되어 최대온도에서 연소가스의 체류시간이 감소되어 NO_x가 저감된다. 따라서 외부가진의 경우 NO_x 저감과 높은 연소성의 유지를 동시에 이룰 수 있다.

3.2 변수별 연구

외부가진 시 연소성과 NOx 생성에 영향을 미친다고 예상되는 가진 주파수, 가진 전압, 연소공기 유속 변화에 대해 변수별 연구를 수행하였다. 실험조건은 표 1의 Case 1~3과 같다. 또한, 변수별 연구 시 모든 데이터의 측정위치는 그림 1의 측정포트 중 버너 선단으로부터 30 cm에 있는 6번째 포트이다.

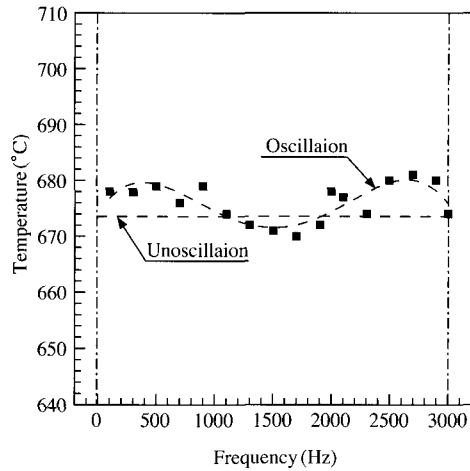
3.2.1 가진 주파수

그림 4는 가진 주파수 변화에 따른 배기가스의 온도, NO, CO를 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 배기가스의 온도를 비교한 것으로 100~3,000 Hz 범위에서는 가진 주파수를 변화시켰을 때 온도 차이가 10°C 이내로 화염의 변동에 의한 변화폭 정도로 큰 차이가 없지만 비교적 가진 시에 온도가 비가진 시보다 높게 측정되고 있다. 하지만 특정 주파수에서 배기가스의 온도가 비가진 시에 비해 낮아지고 있다. 연소성은 그림 4(b)의 CO에서 보는 것처럼 비가진 시에 비해 크게 향상됨을 알 수 있다.

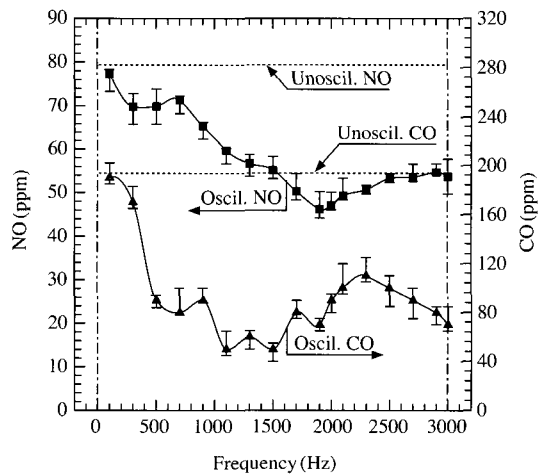
그림 4(b)는 가진 주파수 변화에 따른 NO와 CO 농도를 나타낸 것이다. 주파수 변화에 따라 NO 농도의 저감 변화폭이 매우 크며, 가진의 경우가 비가진과 비교하여 모든 주파수 변화에 대하여 NO 농도가 낮다. 특히 본 연구에 사용된 버너의 경우 주파수 1,900 Hz일 때 저감율이 비가진 시에 비해 41.5%로 가장 높게 나타났다. 따라서 버너의 형태나 형상에 따른 최대 NO 저감율의 주파수 값은 다를 수 있지만 NO의 저감율에 주요 영향인자는 주파수 변화라는 것을 확인할 수 있다. 주파수 변화에 따라 CO 농도 또한 거의 모든 주파수 변화에 대하여 출구에서 CO 농도가 낮게 나타나고 있으며, 가진 주파수가 1,900 Hz일 때 CO는 비가진 시에 비해 64.1% 저감되었다. 이는 이미 기준 화염에서 언급되었듯이 외부가진 경우 NO의 저감과 동시에 연소성의 향상도 이룰 수 있음을 보여주는 것이다. 하지만 주파수 변화에 대해 NO와 CO의 농도가 특정 주파수에서 증가하는 현상을 보임으로 외부가진의 경우 최적운전을 위해서는 적절한 주파수 범위의 선택이 중요하다.

3.2.2 가진 전압

그림 5는 가진 주파수를 1,900 Hz로 고정된 상태에서 가진 전압 변화에 대한 배기가스의 온도, NO, CO를 나타낸 것이다.



(a) Gas temperature



(b) NO and CO concentration

Fig. 4. Effect of the variation of frequency.

그림 5(a)는 배기가스의 온도를 비교한 것으로 비가진 시에 비해 가진 시에 온도가 10°C 이내로 높게 유지되지만 가진 전압의 변화에 대해서는 온도 변화폭이 크지 않는 것은 가진 전압의 변화가 화염의 위치 변화에 큰 영향을 주지 않기 때문이다 (Gutmark et al., 1996).

그림 5(b)는 가진 전압 변화에 대한 NO와 CO 농도를 나타낸 것이다. NO 농도의 경우 가진 전압의 변화에 전체적인 농도변화가 대체적으로 NO 평균농도인 54%의 측정 에러 범위내로 변동이 되고 있다.

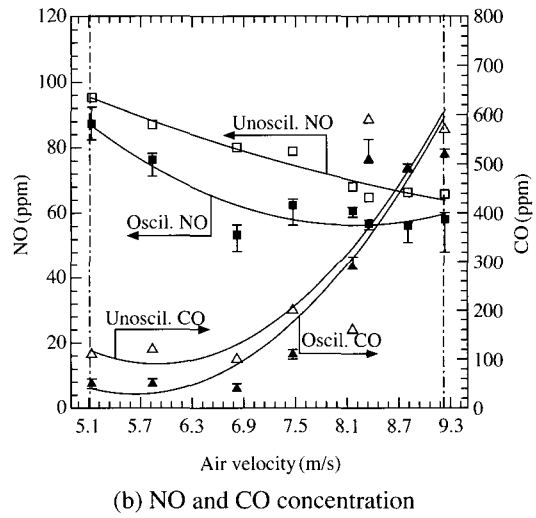
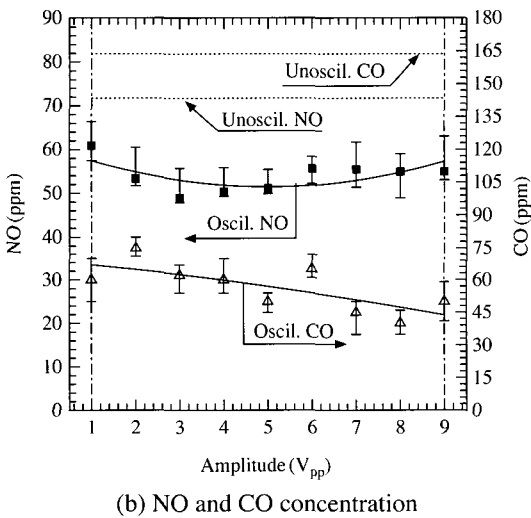
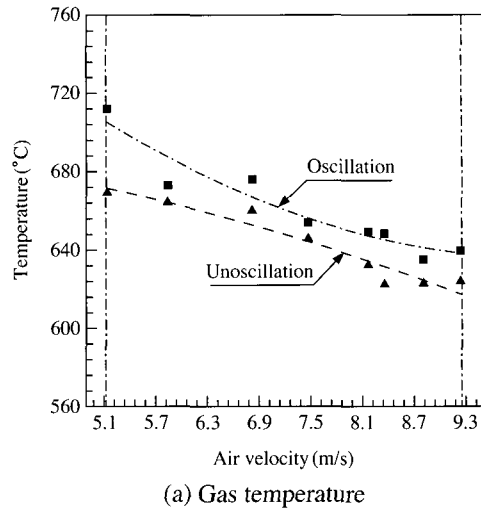
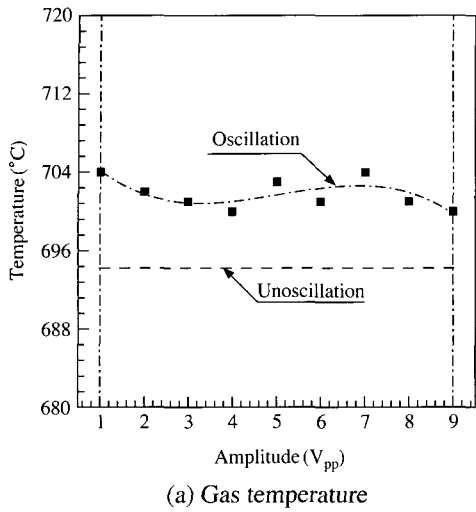


Fig. 5. Effect of the variation of externally forced voltage.

Fig. 6. Effect of the variation of air velocity.

하지만 가진 전압이 3 V_{pp}일 때 NO 저감 효과가 다소 크게 나타나고 있어 본 연구에 가진 전압의 최적 조건으로 하였다. CO 농도는 가진 전압이 증가할수록 대체적으로 CO 농도가 감소하고 있지만 가진 전압에 의해 음파의 진폭이 커짐으로 화염이 불안정해져 가진 전압에 대해 CO 농도 변동이 크다(김문기 등, 2005).

3.2.3 공기 유속

공기 유속 변화는 가진 주파수와 가진 전압을 각

각 1,900 Hz, 3 V_{pp}로 고정된 상태에서 공기 유속을 5.1~9.2 m/s로 변화하였을 때의 배기가스 온도, NO, CO 농도를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 공기 유속 변화에 따른 온도 변화를 나타낸 것으로 가진 시가 전체적으로 높은 연소성을 유지하고 있다. 하지만 가진과 비가진의 경우 모두 공기 유속이 증가할수록 과잉 공기에 의해 배기 열손실 증가로 점차적으로 온도가 감소하고 있다.

그림 6(b)는 NO와 CO 농도를 나타낸 것으로 NO 농도분포의 경우 공기 유속이 증가할수록 점차적으

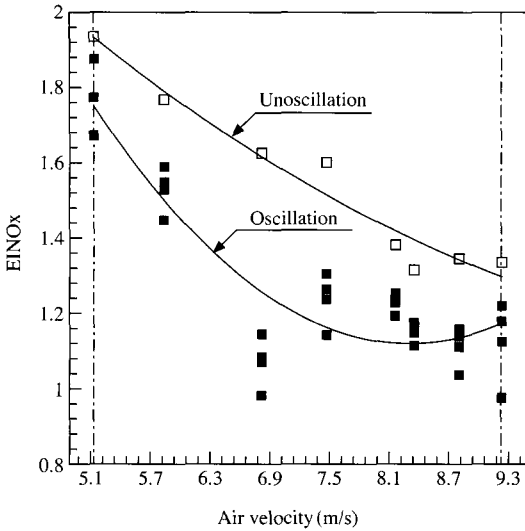


Fig. 7. Characteristic EINOx according to the variation of air velocity.

로 감소하는 온도 분포와 유사한 경향성을 보이고 있는데 이는 NOx 중 고온에서 발생하는 thermal NOx가 대부분으로 연소온도와 밀접하게 관련되어 있기 때문이다. 하지만 CO의 경우 공기 유속 6.8 m/s까지는 대체적으로 유사한 분포를 보이는 반면 공기 유속이 6.8 m/s 이상에서는 급격히 증가하는 것은 과도한 연소 공기에 의해 연소성이 크게 저하되었기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 높은 연소성 유지와 NOx 저감을 동시에 확보하고자 함으로 공기 유속 6.8 m/s를 최적조건으로 하였으며, 이때 가진 시에 NO 저감은 비가진 시에 비해 33.3% 정도 저감됨을 확인하였다.

그림 7은 공기 유속 변화에 따른 가진과 비가진 시에 EINOx를 비교한 것이다.

EINOx (emission index of NOx)는 연료 1 kg 당 발생하는 NOx 생산 gram 수를 나타낸 것으로 화염 후류부에서 NOx를 측정하고, 연료중의 모든 탄소는 CO2로 전환되는 것으로 가정하여 EINOx는 식(1)에 의해 계산하였다.

$$EINO_x = \frac{12 [NO_x] MW_{NO} \times 1000}{[CO_2] MW_{C_{12}H_{26}}} \quad (1)$$

여기서, MW는 각 성분의 분자량이고, 계수 12는

연료인 경유(C₁₂H₂₆) 1몰에서 CO₂가 12몰 생성되는 몰 비를 나타낸 것이다. 또한 화염 후류부 측방향과 반경방향으로의 공기회색에 의한 EINOx는 고려하지 않았다 (Meunier *et al.*, 1998). EINOx는 공기 유속이 증가함에 따라 지수 함수적으로 감소하는 것을 알 수 있으며, 이는 EINOx 값을 공기 유속변화에 따라 지수 함수의 수식으로 표현할 수 있음을 의미한다. 또한 가진 시가 비가진시보다 EINOx 값이 줄어드는데, 이는 Fig. 6 (b)의 NO 농도 분포에서도 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고효율 연소성과 NOx 저감이 가능한 외부가진 기술을 적용한 액상 저 NOx 버너 개발을 위해 실험적 연구를 수행하였다. 연구는 가진 시 연소특성을 규명하기 위해 최적조건에 대한 기준화염 연구와 NO 저감 특성에 영향을 미치는 각 인자에 대한 변수별 연구를 수행하였다.

기준화염 연구를 통해 외부가진의 경우 NOx 저감과 동시에 높은 연소성의 유지가 가능한 것을 알 수 있었으며, 그 저감 메카니즘은 다음과 같다. 버너의 화염 내로 외부가진이 가해지면 비가진의 화염보다 열, 질량, 운동량의 전달이 촉진되어 연소성을 향상시킬 수 있다. 또한, 화염내 극부적인 최대화염 온도 영역이 감소되어 최대온도에서 연소가스의 체류시간이 짧아져 NOx가 저감된다. 또한, 변수별 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 가진 주파수가 1,900 Hz일 때 NOx의 저감 효율은 41.5%로 가장 높게 나타났으며, 이때 CO는 64.1% 저감되었다.

둘째, 가진 전압 변화는 NOx 저감 효율에 영향이 미흡하며 화염 안정성에 대한 영향도 적다.

셋째, 공기 유속 변화는 공기 유속이 증가할수록 과잉 공기에 의한 배기 열손실 증가로 점차적으로 온도가 저하되어 NO가 감소한다. 이때 EINOx는 NO와 유사한 분포특성을 보이고 있다.

참 고 문 헌

김분기, 한정재, 윤상욱, 윤영빈 (2005) 음파가진에 의한 동축

- 공기 수소 확산화염의 NO_x 배출저감 연구, 한국 연소학회지, 10(1), 13-19.
- 이인영, 김동화, 이정빈, 류경옥(2001) 배연탈질 SCR 반응기 내 유동 균일화를 위한 축소 모형 실험 및 전산 해석, 한국대기환경학회지, 17(4), 347-354.
- Cadou, C.P., O.I. Smith, and A.R. Karagozian (1998) Transport enhancement in acoustically excited cavity flows, part 2 : reactive flow diagnostics, AIAA Journal, 36(9), 1568-1574.
- Cho, S. (1994) Properly Apply Selective Catalytic Reduction for NO_x Removal, Chemical Engineering Progress, 39-45.
- Chun, Y.N. and D.Y. Shin (2004) Hazardous Waste Destruction and Nitric Oxide Reduction with Externally Forced Oscillation, Korean J. Chem. Eng., 21(4), 811-815.
- Douglas, D. and O. Ayo (1995) Combustion Acoustic Stability Analysis for Premixed Gas Turbine Combustors, NASA Technical Memorandum 107024, AIAA-95-2470.
- Gutmark, E.J., T.P. Parr, K.J. Wilson, K.H. YU, R.A. Smith, D.M. Hanson-Parr, and K.C. Schadow (1996) Compact waste incinerator based on vertex combustor, Comb. Sci. and Tech, 121, 333-349.
- Kim, Y.S., S.U. Jeong, W.L. Yoon, H.K. Yoon, and S.H. Kim (2003) Tar-formation kinetics and adsorption characteristics of pyrolyzed waste lubricating oil, J. Anal. Appl. Pyrolysis, 70, 19-33.
- Meunier, Ph., M. Costa, and M.G. Carvalho (1998) On NO_x Emissions from Turbulent Propane Diffusion Flames, Combustion and Flame, 112, 221-230.