

진동연소기의 NO_x 저감 효과 연구

강상구* · U.B. Azimov* · 김기성**

NO_x Reduction Study in Oscillating Combustion Burner

Sang-Koo Kang, U.B. Azimov and Ki-Seong Kim

ABSTRACT

The NO_x emission characteristics were studied in an oscillating combustion burner equipped with a specially designed proportioning valve. The effects of various parameters on the NO_x emission which are important in oscillating combustion were investigated. Also, the effects of coincident application of flue gas recirculation(FGR) were evaluated. The results show that oscillating combustion is an efficient tool for reducing NO_x in the burner. Up to 53% of NO_x reduction could be acquired in low frequency and small duty ratio conditions. The coincident application of FGR further reduced the NO_x emission up to 74%. Thus, this study assured that oscillating combustion technology with FGR could be a fascinating method for NO_x reduction in industrial burners.

Key Words : Oscillating Combustion, Proportioning Valve, Flame Pattern, Hot Wire Anemometry, NO_x, FGR(Flue Gas Recirculation)

기 호 설 명

λ Excess air ratio
DR Duty Ratio

FGR Rate of Flue Gas Recirculation

1. 서 론

범세계적인 환경규제의 강화로 대기오염 물질의 주요 원인인 화석연료 연소장치에서의 오염물질 배출을 줄이기 위한 기술개발 노력이 행해지고 있다. 화석연료 연소가스 중 대표적인 오염물질은 일산화탄소(CO), 미연탄화수소(HC), 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x) 등이 있으며, 이 중에서 NO_x는 산성비와 광학 스모그의 원인이 되는 것으로 인체와 동식물에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 산업용 연소장치에서 배출되는 NO_x는 주로 고온에서 생성되는 열적 NO_x(thermal

NO_x)로서 크게 두 가지 접근방식으로 이를 감소시키고 있는데, 하나는 연소과정에서 NO_x의 생성을 줄이는 방법과 다른 하나는 배기가스를 후처리하여 줄이는 방법이다. 후자는 반응물의 구입 및 운전에 상당한 경비가 소요되므로 경제적, 환경적 관점에서 볼 때, 연소과정에서의 NO_x저감이 매우 중요하며, 이를 위해서 다양한 연구들이 행해지고 있다.

연소과정에서의 NO_x 저감방법으로는 화염장의 온도를 낮추는 것이 효과적이며, 이를 실현하는 방법으로서 배기가스 재순환, 단계적 연소법, 물 또는 스팀분사 등이 많이 이용되고 있다.[1] 그리고, 음파가진을 이용하는 방법에 대한 연구도 화염구조 규명이나[2, 3] NO_x 저감 측면에서 [4, 5] 행해지고 있다. 최근에는 진동연소기술을 적용하여 NO_x 생성을 줄이는 연구가 행해지고 있으며 이를 이용하여 40~70% 정도 NO_x를 줄

* 전남대학교 기계공학과 대학원

** 전남대학교 기계·자동차공학부

책임저자, sngkim@chonnam.ac.kr

인 결과도 보고되고 있다.[6, 7]

진동연소는 연료라인에서 연료노즐에 근접하여 유로면적의 제어가 가능한 밸브를 설치하고 연료유량을 주기적으로 제어함으로써 분사되는 연료제트의 축 방향 연료농도를 농후-희박상태로 반복하도록 함으로써 연소로 내의 화염을 주기적으로 변화시키는 방법이다. 이와 같이 주기적인 농후-희박 조건에서의 연소는 화염장 온도를 낮출 수 있어 연소과정에서 NOx의 생성을 줄일 수 있고, 연소장 내부의 유동변화를 심화시킴으로써 열전달 효과를 높여 연료의 경제성도 약 3%정도 향상시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다.[7]

배기가스 재순환 방법은 배기가스의 일부를 연소용 공기에 혼합시킴으로써 연료와 산소의 급격한 혼합을 억제시켜 완만한 연소를 시키고, 불활성가스에 의한 흡수 열량 증가로 화염의 국부최고온도와 화염의 평균온도를 저하시켜 NOx 생성을 억제하는 방법이다.[8, 9]

진동연소와 배기가스 재순환 연소는 각기 화염의 평균온도를 저하시켜 연소과정에서 NOx 생성을 저감시키는 효과가 있으며, NOx 저감효과를 높이기 위해 이 두 가지 방법을 병행하는 것이 가능하나 아직 이에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

진동연소기술을 적용한 연소장치의 연소 및 배기특성은 연료유량을 주기적으로 제어하는 밸브의 특성에 크게 좌우된다. 연료유량을 주기적으로 제어하는 인자 즉, 주파수, 듀티비(duty ratio), 유량변화 형태 등 여러 인자에 의해 영향을 받으나 아직까지 이에 대한 연구가 미흡한 편이다.

따라서, 본 연구에서는 진동연소 버너의 상용화를 위한 선행연구로서 비례제어 밸브를 통하여 연료유량이 제어되는 진동연소 파일럿 버너에 대해 주요 변수들이 NOx 배출에 미치는 영향을 규명하였으며, 아울러 배기가스 재순환 기술을 진동연소 버너에 적용하여 NOx 배출저감 특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 비례제어밸브

분사되는 연료제트를 주기적으로 축 방향으로 성층화시키기 위해서는 연료노즐에 인접한 위치에 장착하여 Fig. 1과 같이 연료유량을 주기적으로 제어할 수 있는 밸브가 필요하다. 이를 위해서 Fig. 2와 같은 비례제어밸브를 개발하여 사용

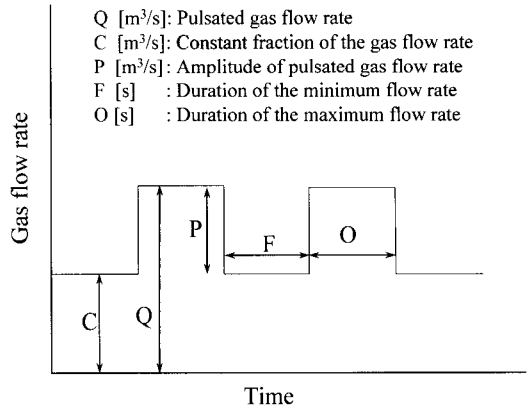


Fig. 1 Ideal flow pattern of a proportioning valve for oscillating combustion

하였다.[10]

이 밸브는 솔레노이드에 의해 구동되며 탄성체(elastomer)를 누르는 정도에 따라 유로 면적이 달라지게 되어있다. 탄성체를 축방향으로 누르는 힘은 솔레노이드에 인가되는 전압에 의해 조절되며, 솔레노이드의 작용력은 인가전압, 동작주파수, 듀티비(Duty ratio) 등에 의해 결정된다. 비례제어밸브의 탄성체는 2액형 실리콘으로 되어 있으며, 주파수는 25Hz, 유량은 10L/min이하에서 이용할 수 있도록 제작되어졌다.

이 밸브의 운전 조건에 따른 특성을 파악하기 위해서 유동속도 및 밸브 상류부 압력을 측정하였으며, 유동속도는 열선유속계(IHW-100)를 이용하여 측정하였고, 밸브 상류부 압력은 스트레인 게이지형 압력센서를 이용하여 측정하였다.

2.1.2 파일럿 버너 시험장치

산업용 버너와 유사한 형태의 버너에 진동연소기술을 적용하여 NOx 배출특성을 파악하기 위해 Fig. 3과 같은 구조를 갖는 10kW급 소형 파일럿 버너를 제작하였다.

이 파일럿 버너의 연료 및 공기 노즐부의 구조는 Fig. 2와 같은데, 연료노즐의 상류부에 비례제어밸브가 장착되어 있어 연료유량을 주기적으로 변화시킬 수 있다. 노즐부에서 연료는 반경방향의 6개 구멍을 통해서 분출되고 보염판에 뚫린 구멍과 보염판과 노즐하우징 사이의 틈을 통해서 분출되는 공기와 혼합이 이루어지면서 연소실로 분출된다. 분출되는 혼합기의 연료농도는 완전히 균일하지는 않다하더라도 급속하게 혼합이 이루어진다. 따라서 관찰되는 화염도 예혼합화염에 가까운 특성을 나타내는 것으로 나타났다.

진동연소기에서 연료유량을 제어하기 위한 비

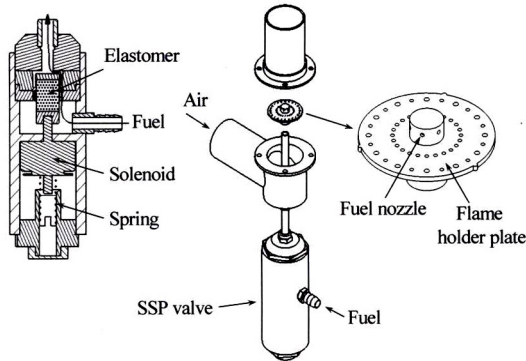


Fig. 2 The structures of the proportioning valve and the nozzle assembly of a pilot burner

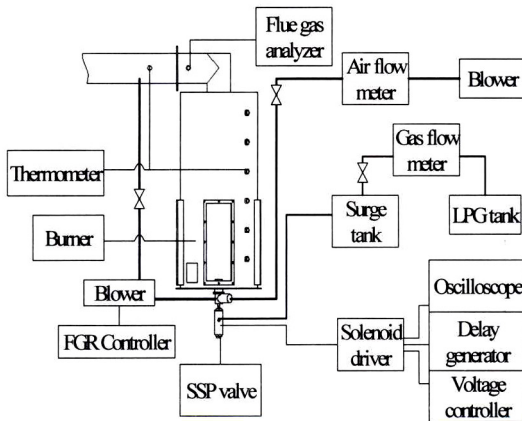


Fig. 3 Layout of a pilot burner system

레제어밸브를 노즐로부터 멀리하면 밸브로부터 노즐간의 연료관이 버퍼역할을 해서 유량변화특성이 사각과 형상으로부터 점차 벗어나게 되어 진동연소 효과가 줄어들게 되는데, 본 연구에서는 효과를 극대화하기 위해 밸브를 노즐에 근접한 위치에 설치하였다.

이 파일럿 버너의 연소실은 직경 50cm, 높이가 100cm이며 빠른 온도상승과 연소실 내부를 고온으로 유지하기 위해 안전사용온도가 1,430℃인 세라크올로 연소실 내부와 연소로 벽면을 단열하였으며, 세라크올 표면을 보호하기 위해 안전사용온도가 1,500℃인 세라크올 코팅시멘트를 약2mm 두께로 표면에 발랐다. 화염관찰을 위해 4면에 가시화창을 설치하였고, K-type 열전대를 장착하여 연소실 벽면온도와 배기가스 온도를 측정하였다. 배기가스 측정은 배기가스분석기(Vario-plus)를 이용하여 NO_x와 O₂를 측정하였다. 공기와 연료량은 각각 상류부에 유량계를 설치하여 측정하였는데, O₂ 측정 결과로 유추한 과

잉공기비와 3%이내의 오차 범위에서 일치하였다.

배기가스 재순환을 위해 버너의 배기출구에 가까이 배기가스 재순환 라인을 설치하였고, 고온에서도 견딜 수 있는 송풍기를 사용하여 버너의 공기공급라인에 연결하였다.

2.2 실험방법

시험용 파일럿 버너의 진동연소특성은 연료라인에 설치되어 있는 비례제어밸브의 제어인자에 의해 영향을 받는다. 비례제어밸브의 기하학적 형상과 탄성체 및 솔레노이드가 결정되었다고 했을 때 유량과 사이클적으로 변하는 유량형태는 솔레노이드 인가전압, 주파수, 듀티비 등에 의해 복합적으로 영향을 받게 된다. 본 시험에서는 시험인자를 단순화시키기 위해 솔레노이드 인가전압을 대표적인 값으로 설정하여 일정하게 유지하고, 주파수와 듀티비를 변화시켰다. 여기서 듀티비는 솔레노이드의 한 주기 중에서 솔레노이드가 비활성화 되어 있는 기간의 비로 정의하였는데(일반적인 정의와는 반대), 듀티비가 크면 특정 주파수에서 솔레노이드 작용에 의해 탄성체가 유로를 막는 기간이 짧아져 유량변화 주기에서 유량이 많은 구간이 상대적으로 길어짐을 의미한다. 그러나, 이 듀티비는 솔레노이드에 가해지는 인가전압을 바탕으로 정한 것으로 결과로서 나타나는 밸브의 개폐기간이 듀티비가 커지면 열려있는 기간이 일반적으로 길어야 하지만 밸브의 동특성이나 주파수 등의 영향에 의해 정확하게 비례적인 관계를 갖지는 않는다. 본 시험에서는 듀티비를 40~70%로 설정하였다.

시험한 주파수 영역은 NO_x 저감효과가 크고 화염의 안정성에 문제가 없는 구간인 3~20Hz까지이며 3Hz미만에서는 조건에 따라 화염의 불안정성이 커지고, 20Hz이상에서는 NO_x 저감효과가 적게 나타났다. 주파수가 3Hz미만으로 되어 사이클 주기가 길어지면 연료제트 펄스간의 간격이 커지고, 솔레노이드 인가전압이 동일할 때 비례제어밸브의 탄성체를 누르는 힘이 커져서 밸브가 완전히 닫히게 됨으로써 화염의 불안정성이 커지게 된다.

연료의 평균유량은 모든 조건에서 6L/min으로 하였으며, 조건에 따라 비례제어밸브 상류부에 설치한 밸브의 개도를 달리하여 주파수나 듀티비가 다른 조건에서도 평균연료유량이 일정하도록 하였다.

연료는 가정용 LPG를 이용하였고, NO_x 측정은 벽면온도가 정상상태에 도달한 후에 측정하였는데, 벽면온도는 운전조건에 따라 다소 차이가 있지만 830~870℃ 범위에서 측정하였다.

배기가스 재순환량은 배기가스 재순환라인에 설치한 터보송풍기의 회전속도를 인버터를 이용하여 조절함으로써 변화시켰으며, 아래의 배기가스 재순환을 공식과 배기가스 분석기로 측정된 O₂농도를 바탕으로 계산하였다.

$$FGR = \frac{21 - \text{입구측 } O_2 \text{ 농도}}{\text{입구측 } O_2 \text{ 농도} - \text{배기가스 } O_2 \text{ 농도}} \times 100$$

3. 결과 및 고찰

3.1 비례제어밸브 유량특성 측정

비례제어밸브의 유량특성을 파악하기 위하여 연료관 출구의 중심속도를 열선유속계로 측정하였다. LPG 대신 공기를 이용하였으며, 연소를 시키지 않는 조건이기 때문에 실제 연소상황과는 다소 차이가 있을 수 있으나 그 형태는 비슷할 것으로 예상된다.

이 밸브는 솔레노이드에 의해 구동되며 탄성체를 누르는 정도에 따라 유로면적이 달라지게 되어있다. 탄성체를 누르는 솔레노이드의 작용력은 인가전압, 동작 주파수, 듀티비 등에 의해 결정된다. 이 중에서 인가전압은 고정하였는데, 그 이유는 많은 변수 중 하나를 고정하기 위함이며 여러 주파수에서 작동이 가능하고, 솔레노이드의 최고 사용가능 전압보다 조금 낮은 전압을 선택하였다.

각 유속측정 결과를 Fig. 4 ~ Fig. 8에 도시하였다. 주파수가 낮은 3Hz와 4Hz에서는 솔레노이드의 힘이 커서 밸브의 개폐가 거의 완벽한 직사각파 모양을 나타낸다. 8Hz에서도 유량변화가 사각파 모양으로 이루어지나 밸브 동특성 영향으로 탄성체 진동이 있음에 따라 유량도 진동함을 알 수 있다. 14Hz와 20Hz의 경우에는 솔레노이드 아마추어의 진동이 심해져 유량변화가 복잡한 형태를 가지며 듀티비가 증가할수록 솔레노이드 힘이 약해지고 작용기간이 짧아져서 주진동 사이에 주진동에 버금가는 2차진동이 나타내기도 한다. Fig. 8의 경우에서 보듯이 20Hz, 듀티비 70%의 경우에는 밸브를 닫으려는 동작이 미약하게 나타나지만 거의 열려 있는 특성을 보였으며, 실제 배기가스 측정 실험에서도 거의 정상상태의 연소와 비슷한 결과를 보여주었다.

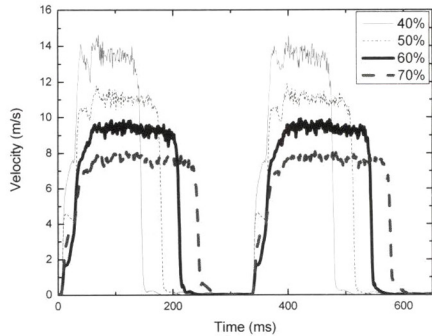


Fig. 4 Velocity profiles at the nozzle exit in different duty ratios: 3Hz, 6L/min.

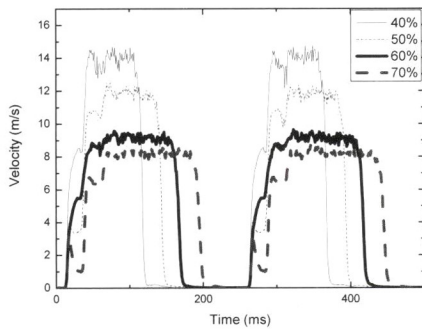


Fig. 5 Velocity profiles at the nozzle exit in different duty ratios: 4Hz, 6L/min.

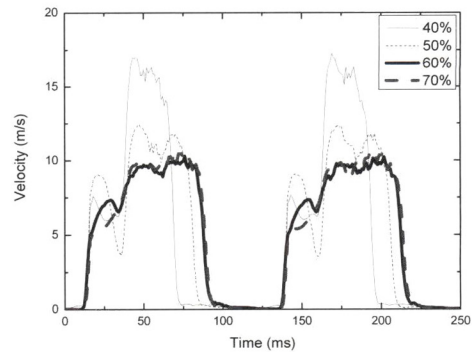


Fig. 6 Velocity profiles at the nozzle exit in different duty ratios: 8Hz, 6L/min.

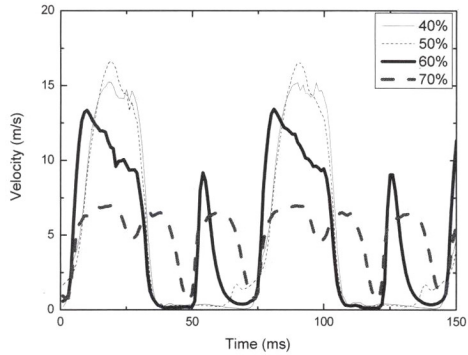


Fig. 7 Velocity profiles at the nozzle exit in different duty ratios: 14Hz, 6L/min.

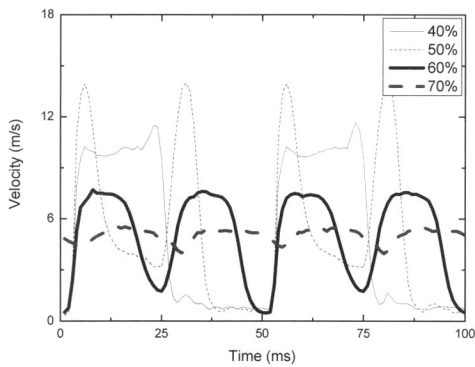


Fig. 8 Velocity profiles at the nozzle exit in different duty ratios: 20Hz, 6L/min.

3.2 진동연소 화염관찰 결과

파일럿 버너에서 진동연소의 주기적인 화염변화 특성을 조사하기 위해 고속카메라(APX)를 이용하여 화염을 관찰하였다. Fig. 9는 연료 유량이 6 L/min, 과잉공기비(λ) 1.1, 듀티비가 40%, 주파수가 8Hz와 20Hz인 조건에서의 화염과 정상조건에서의 화염을 촬영한 사진이다. 진동연소 조건에서는 연료유량이 주기적으로 변함에 따라 짧은 화염과 긴 화염이 주기적으로 반복되는 것을 알 수 있다. 듀티비가 40%임에도 앞서의 밸브유량 특성 측정시험과는 달리 연료유량이 적은 구간이 짧은 것은 비례제어밸브 후단에 Fig. 2와 같은 노즐 어셈블리가 있어서 버퍼역할을 하기 때문이다.

화염길이를 보면 사이클에서 최소길이일 경우는 수cm 이내인 반면 최대길이의 경우는 8Hz에서는 약 35cm 정도로 Fig. 9(c)의 정상조건에서와 비슷하다. 20Hz에서는 약 25cm 정도로 주파수에 따라 크게 변하는 것을 알 수 있다. 주파수가 높은 경우가 최대화염의 길이가 짧게 나타나는데

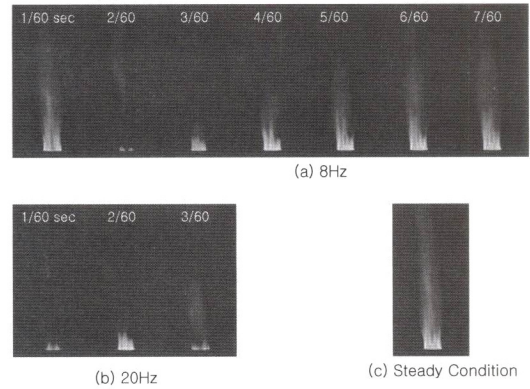


Fig. 9 Sequential flame images in the oscillating and steady combustion conditions.

이는 짧은 주기가 반복되면서 분출제트의 유동변동이 심하게 되고 축방향으로 화염이 단절되는 것으로 인해 공기-연료 혼합 촉진되기 때문이다.

3.3 진동연소 버너의 NOx 배출특성

진동연소 주요 변수들에 의한 NOx 배출특성을 규명하기 위하여 파일럿 버너에서 LPG를 연료로 하여 시험을 수행하였다. 시험인자는 일반적인 연소시험에서 주요 변수인 과잉공기비와 진동연소기만의 특수한 변수인 주파수 및 듀티비이다. 각 주파수별 NOx의 변화량을 Fig. 10~Fig. 14에 도시하였다. 과잉공기비(λ)가 1.01, 1.05, 1.10인 조건에서 실시하였으며, 주파수는 3, 4, 8, 14, 20Hz에서 실험하였다.

Fig. 10~Fig. 14에서의 NOx 배출 경향을 보면 과잉공기비가 1.01에서 1.10으로 증가함에 따라 NOx 배출은 다소 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 잘 알려진 바와 같이 NOx의 발생기구 중에서 열적NOx는 산소농도가 높고 고온인 조건에서 발생이 많기 때문이다.

Fig. 15에서와 같이 저 주파수(3~4Hz)와 듀티비 40%에서 NOx의 감소율이 약 40~50%로서 가장 효과가 크게 나타났다. 이는 비례제어밸브 유량특성 시험 결과에서도 알 수 있듯이 저주파수에서 밸브의 개폐에 의한 연료유량 변화가 사각과 형태를 가지고 있어서 연료농도가 농후한 영역과 희박한 영역간의 차이가 큰 상태에서 연소가 이루어짐으로써 화염의 온도가 낮아져서 NOx의 생성이 억제되었음을 의미한다. 모든 주파수에서 듀티비가 감소함에 따라 NOx 생성도 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 듀티비가 작을수록 앞 사이클의 화염과 뒤이은 사이클의 화염간의 거리가 멀어져 진동연소 효과가 크게 나타나기 때문이다.

주파수가 증가할수록 NOx배출량이 증가하여 20Hz의 경우에는 진동연소를 하지 않은 정상상태 연소조건과 거의 같은 특성을 나타냈는데, 이는 유량특성 시험에서와 같이 연료유량 변화가 사각파형태를 갖지 못하고, 매 사이클 형성되는 농후한 영역 화염간의 거리가 짧아져 연속적으로 분사되는 연료제트에 의한 정상상태에서의 운전조건과 비슷해지기 때문이다. 특히 듀티비 60~70%는 정상상태의 운전조건과 비교할 때, 변화가 없었으며, 공기비가 많아질수록 더욱 NOx의 저감에는 영향을 미치지 못하고 있다는 것을 알 수가 있다.

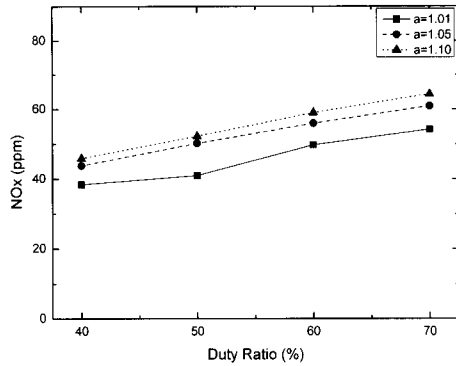


Fig. 12 NOx emission characteristics in different duty ratios and air excess ratios at 8Hz.

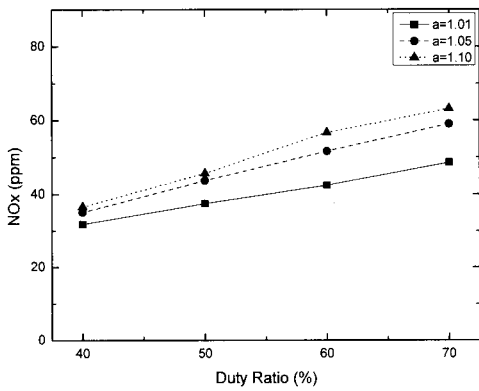


Fig. 10 NOx emission characteristics in different duty ratios and air excess ratios at 3Hz

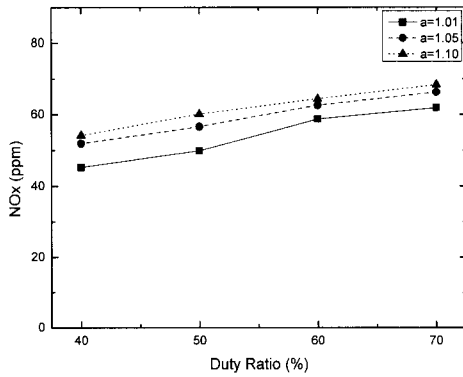


Fig. 13 NOx emission characteristics in different duty ratios and air excess ratios at 14Hz.

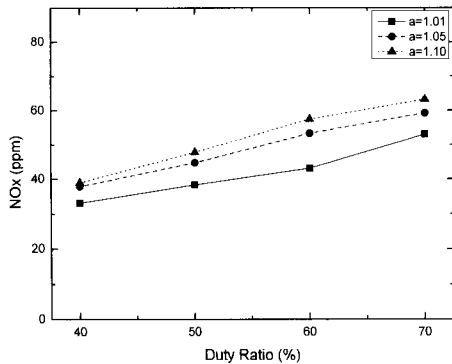


Fig. 11 NOx emission characteristics in different duty ratios and air excess ratios at 4Hz.

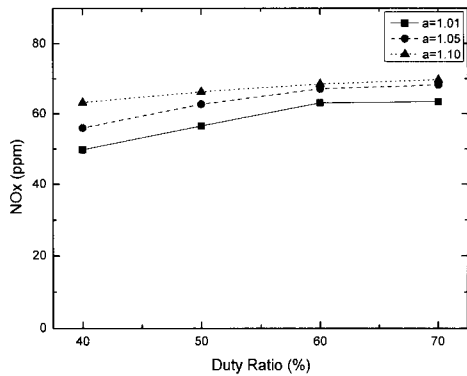


Fig. 14 NOx emission characteristics in different duty ratios and air excess ratios at 20Hz.

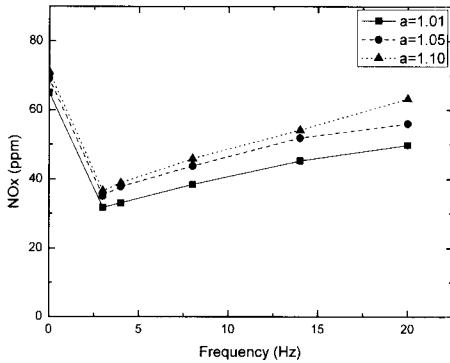


Fig. 15 NOx emission characteristics with respect to frequency and air excess ratio at duty ratio of 40%.

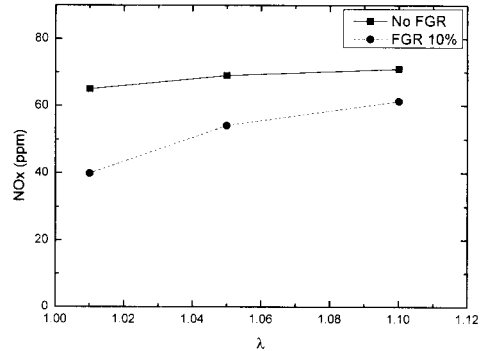


Fig. 16 FGR effects for NOx emission in steady burning condition.

3.4 진동연소와 배기가스 재순환의 영향

NOx 저감 효과가 큰 진동연소 조건에서 배기가스 재순환의 영향을 파악하기 위해 FGR 10% 조건에서 파일럿 버너에 대해 NOx 측정 시험을 수행하였다. 정상연소 조건에서의 FGR 10%에 대한 영향을 Fig. 16에 도시하였다. 일반적인 연소장치에서와 마찬가지로 FGR 10%인 경우가 FGR을 적용하지 않은 조건에 비해서 NOx 배출이 적은 것을 알 수 있다. 과잉공기비가 증가함에 따라 그 효과는 줄어든다.

진동연소와 FGR을 동시에 적용한 결과를 Fig. 17 ~ Fig. 20에 도시하였다. FGR과 진동연소를 동시에 적용한 경우가 진동연소만을 적용한 경우에 비해 NOx 배출이 크게 줄어드는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해서 진동연소가 NOx 저감에 효과적이지만 배기가스 재순환을 할 경우 추가적인 감소효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 17과 같이 NOx 저감 효과가 큰 $\lambda=1.01$, 3Hz, DR=40%인 조건에서는 정상연소조건에 비해 약 74%정도의 NOx 저감효과가 나타났는데, 이 조건에서 진동연소 만에 의한 NOx 저감효과가 53%정도인 것과 비교하면 FGR 적용에 의해 20% 정도의 추가적인 NOx 저감효과가 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 19와 Fig. 20은 λ 가 1.05인 조건으로 정상연소조건에서와 마찬가지로 과잉공기비가 증가하면 FGR의 NOx 저감 효과가 떨어짐을 알 수 있다.

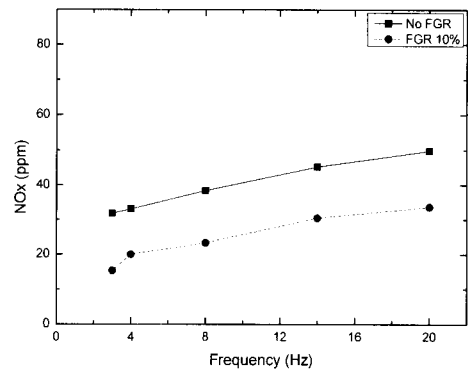


Fig. 17 FGR effects for NOx emission in oscillating combustion condition: $\lambda = 1.01$, Duty Ratio= 40%.

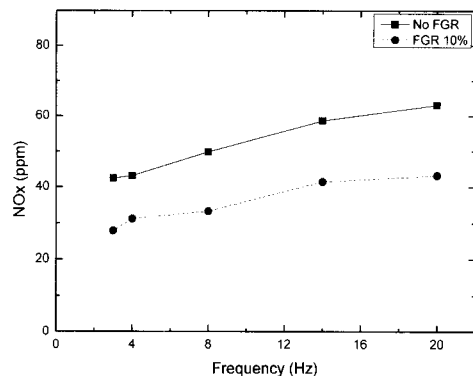


Fig. 18 FGR effects for NOx emission in oscillating combustion condition: $\lambda = 1.01$, Duty Ratio= 60%.

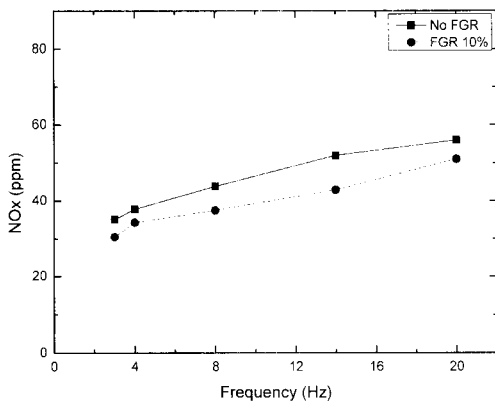


Fig. 19 FGR effects for NOx emission in oscillating combustion condition: $\lambda=1.05$, Duty Ratio= 40%.

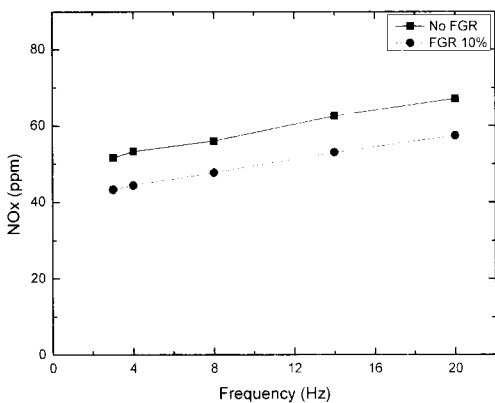


Fig. 20 FGR effects for NOx emission in oscillating combustion condition: $\lambda=1.05$, Duty Ratio= 60%.

4. 결론

비례제어밸브를 적용한 진동연소 파일럿 버너에서 주요 변수의 NOx 배출특성에 미치는 영향을 규명하고, 배기가스 재순환 기술을 진동연소에 적용했을 때 NOx 저감 효과를 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 개발한 비례제어밸브의 유량변화특성은 낮은 주파수에서는 사각파 형상을 나타내나 주파수가 높아지고 듀티비가 커질수록 슬레노이드 진동자의 동특성이 심해지면서 한 사이클을 이루는 동안 두 번의 피크를 나타내기도 했다.
- 2) 진동연소에 의한 화염길이는 사이클 중 최소 화염길이는 수 cm로 작았으며, 최대 화염길이는

낮은 주파수에서는 정상연소조건에 근접했고, 주파수가 증가할수록 짧아졌다.

3) 진동연소만을 적용했을 때 NOx 저감효과는 낮은 주파수, 듀티비가 작을수록 크게 나타났으며, 최대 53% 정도의 감소효과를 나타냈다.

4) 배기가스 재순환과 진동연소를 같이 적용했을 때의 NOx 저감효과를 배기가스 재순환을 10%에서 시험한 결과 최고 74%정도까지 NOx가 저감되었다.

후 기

이 연구는 2005년 한국과학재단 지역우수과학자 지원사업을 통해 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- [1] P. Basu, C. Kefa, and L. Jestin, "Boilers and Burners", Springer
- [2] K.M. Lee, T.K. Kim, S.G. Kim, J. Park, and S.I. Keel. "A Visual Study on Flame Behavior of Tone-Excited Non-premixed Jet Flames" Fuel, vol.81, pp2249-2255. 2002
- [3] S.G. Kim, K.T. Kim, J. Park and B.O. Chang. "Beavior of premixed flame fronts excited with a fuel tube resonance frequency." Combustion and Flame. vol. 139, pp351-357. 2004
- [4] Y.N. Chun and D.Y. Shin, "Hazardous Waste Destruction and Nitric Oxide Reduction with Externally Forced Oscillation", Korean J. Chem. Eng., Vol. 21, No. 4, pp. 811~815, 2004
- [5] 배상훈, 오상현, "음파가진을 이용한 확산 화염의 연소 배기와 화염 내부의 국소 NO 농도 변화특성에 대한 실험적 연구", 대한기계학회 2001년도 추계학술대회논문집 B, pp. 137~142, 2001
- [6] O. Charon, D. Jouvaud, and B. Genies, "Pulsated O₂/Fuel Flame as a New Technique for Low NOx Emission", Combustion Technologies for a Clean Environment, Gordon and Breach Publishers, pp. 395-406, 1995
- [7] J. C. Wagner, "NOx Emission Reduction by Oscillating Combustion", Final Report, GTI Project No. 61111
- [8] E.S. Cho, S.H. Chung, "Numerical Study on NO Emission with Flue Gas Dilution in Air and Fuel Sides", KSME Int. J., Vol. 19, No. 6, pp. 1358~1365, 2005
- [9] K.L. Kim, H.J. Kim, B.S. Park and J.J.

Kim, "NO_x Emission Characteristics of 100KW Gas Burner by FGR", 제23회 KOSCO Symposium 논문집, pp. 1-7

[10] 김기성, 김한욱, "밸브 구동 진동연소기의 화염특성 연구", 한국연소학회지, Vol.9, No.3, pp.26~43(2004)