

밸브 구동 진동연소기의 화염특성 연구

김기성* · 김한욱**†

A Study on the Characteristics of Flames in a Valve Driven Oscillating Combustion Burner

Ki-Seong Kim*, Han-Uk Kim**†

ABSTRACT

The flame patterns were investigated in an oscillating combustion burner equipped with a specially designed proportioning valve. The proportioning valve is driven by a solenoid and has an elastomer part which controls the valve opening area. For characterizing the valve, nozzle exit velocities were measured with a hot wire anemometry. The flame patterns were investigated by direct photographing methods using a high speed camera and a digital camera. The results show that the nozzle exit velocities could be controlled diversely and rapidly changed, so the valve seemed appropriate for the oscillating combustion burner application. Mushroom shape and highly wrinkled structure were typical features of the flames in the oscillating combustion burner. As the oscillating intensity of the fuel flow increased, the flame length was shortened.

Key Words : Oscillating Combustion, Proportioning Valve, Flame Pattern, Hot Wire Anemometry, NO_x, Flame Length

기 호 설 명

DR Duty Ratio
Ls Steady Flame Length

L_f Flame Length

1. 서 론

범세계적으로 환경규제는 점차 엄격해져 가고 있으며, 특히 연소장치에 의한 대기오염 비중이 크기 때문에 배기 오염물질을 줄이기 위해 새로운 연소기술을 개발하거나 기존의 연소기술을 개선하기 위해 많은 노력이 행해지고 있다. 질소산화물(NO_x)은 산성비와 광화학 스모그의 원인이 되는 주요 규제대상 배기 오염물질이다. 산업용 연소장치에서 배출되는 NO_x는 주로 고온에서

생성되는 thermal NO_x이다. 이러한 연소장치에서 배출되는 NO_x의 저감은 크게 두 가지 방법으로 할 수 있는데, 하나는 연소과정에서 NO_x의 생성을 줄이는 방법과 다른 하나는 배기가스를 후처리(SNCR, SCR ...)하여 줄이는 방법이다. 후자의 방법은 반응물 구입 및 운전에 상당한 경비가 소요되는 문제점이 있다. 따라서 경제적, 환경적 관점에서 볼 때, 연소과정에서의 NO_x 저감이 매우 중요하며, 이를 달성하기 위한 노력이 절실하다.

연소과정에서 NO_x 저감방법으로서의 화염온도를 낮추는 것이 효과적인데, 이를 실현하는 방법으로서 배기가스 재순환, 희박-농후법, 단계적 연소법 등이 많이 이용되고 있다. 최근에는 진동

* 여수대학교 기계공학과

** 여수대학교 기계공학과 대학원

† 연락처, sngkim@yosu.ac.kr

연소기술을 적용하여 NOx 생성을 줄이는 연구가 행해지고 있는데[1,2], 40~80% 정도 NOx를 줄였다는 결과도 보고 되고 있다[3].

진동연소는 연료노즐에 근접하여 유로면적의 제어가 가능한 밸브를 설치하고 연료유량을 주기적으로 제어함으로써 연료제트의 축방향 연료농도를 농후-희박상태로 반복하도록 하여 연소로 내의 화염을 주기적으로 변화시키는 방법이다. 이와 같이 하면 화염온도를 낮출 수 있어 결과적으로 NOx의 생성을 줄일 수 있고 연소장 내부의 유동변화를 심화시킴으로써 열전달 효과를 높여 연료의 경제성도 약 3% 정도 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.

진동연소는 연료관의 연료에 펄스를 가한다는 측면에서 보면 음파가진 방법[4]~[7]과 유사성이 있다. 그러나 음파가진 경우 연료관 내의 공진 특성을 이용하는 반면 밸브를 이용하는 진동연소는 직접적으로 펄스를 생성시킨다. 그리고, 산업용 버너에의 적용 용이성과 다양한 제어특성을 감안하면 밸브 구동에 의한 진동연소가 상업성이 크다고 볼 수 있다. 음파가진 연소에 대한 연구는 화염구조와 연소특성 파악 측면에서 다수의 연구결과가 보고 되어 왔다. 그러나, 진동연소에 대해서는 산소/천연가스 버너에 대해 NOx 배출특성에 대한 연구결과[3]는 보고 되었으나 화염구조, 유동특성 등에 대한 연구는 미미한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 진동형 저NOx 연소장치 개발을 위한 선행 연구로서 진동연소 화염특징과 구조를 규명하였다. 이를 위해서 진동형 버너의 상용화에 필요한 고내구성 비례제어밸브를 제작하였고 이 밸브의 특성 규명을 위해 노즐 출구 유속을 열선유속계로 측정하였다. 그리고, 이 밸브를 적용한 비례혼합 동축형 버너에서 고속카메라와 디지털 카메라를 이용하여 진동연소 화염특징과 구조를 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 비례제어밸브

버너에 연료를 Fig. 1과 같은 형태로 공급하기 위해서는 연료 유로면적의 개폐 정도를 제어할 수 있는 비례제어밸브가 필요하다. 따라서 Fig. 2와 같은 구조의 밸브를 제작하였다.

이 밸브는 솔레노이드에 의해 구동되며 탄성체(elastomer)를 누르는 정도에 따라 유로면적이 달라지게 되어있다. 탄성체를 중심축방향으로 누르면 탄성체가 체적보전을 위해 반경방향으로 늘어난 특성을 이용하여 유로면적을 조절하는 방법이다. 탄성체를 누르는 힘은 솔레노이드에 인가되는 전압에 의해서 조절되며, 솔레노이드의

작용력은 인가전압, 동작 주파수, 듀티비(duty ratio) 등에 의해 결정된다. 이 밸브의 제작에 있어 중요한 점은 주 운전영역에서의 솔레노이드의 작용력과 탄성체의 탄성을 적절하게 조화시키는 것이다. 자체 제작한 비례제어밸브의 탄성체는 2액형 실리콘을 이용하였으며 경화제량을 조절하여 적합한 탄성을 얻었다. 이 밸브는 주파수 25Hz, 유량은 10l/min이하에서 이용할 수 있도록 제작되었다. 이 밸브의 운전조건에 따른 특성을 파악하기 위하여 열선유속계(Ganomax, IHW-100)를 이용하여 유속을 측정하였다.

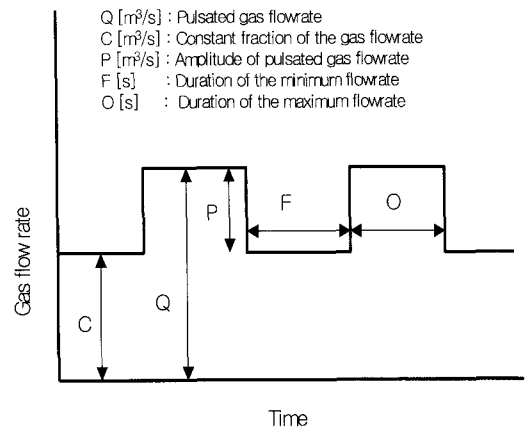


Fig. 1 Idealized flow-rate profile of the fuel supply

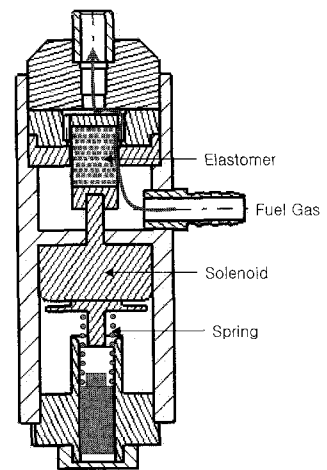


Fig. 2 Sectional view of the proportioning valve

2.2 진동연소 버너

진동연소 버너는 Fig. 3과 같이 동축버너 형태이며, 연료는 프로판이 주성분인 가정용 LPG를 사용하였다. 연료관은 내경 5mm의 파이렉스 관으로 되어 있으며 버너 중심축에 위치하고 있다. 연료관 주위는 직경 110mm, 셀밀도 400cps인 세라믹 하니콤을 설치하여 연료 제트 주위의 공기 유동을 일정하게 하였다. 연료관 주위의 공기 유속은 0.1m/s로 낮게 하여 화염을 안정화시키면서 화염특성에는 영향이 적도록 하였다. 연료관은 출구단을 날카롭게 하여 보염효과를 제거하였다. 밸브로부터 연료관 끝까지의 길이는 120mm로 짧게 하여 관의 체적과 길이에 따른 펄스의 시간 지연이나 관내 진동효과를 최소화하였다. 연료 체적유량은 습식가스미터(Sinagawa, W-NK-5A)를 이용하여 측정하였다.

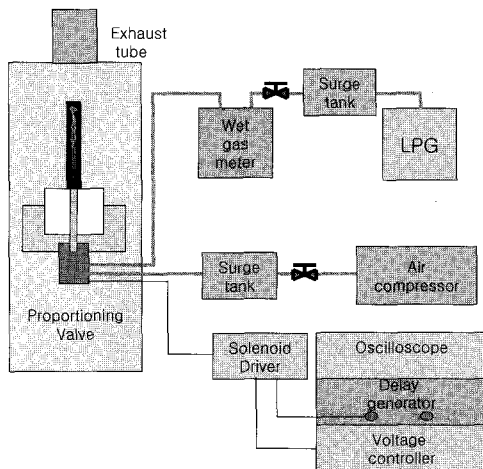


Fig. 3 Layout of the oscillating burner experimental system

비례제어밸브의 구동펄스는 펄스지연발생기(DG535)에 의해 주파수 및 듀티비가 조정되며 솔레노이드 구동 전압은 가변전원공급기에 의해 조절되며 0~30V 사이의 DC 전원이 공급된다.

화염형상은 고속카메라(Photron, APX)와 디지털 카메라(Nikon, D-100)를 이용하여 사진을 찍었는데, 순간적인 화염은 고속카메라를 이용하여 1,000 fps로 촬영하였으며, 여러 사이클을 시간에 대해 평균한 화염은 노출시간을 1초로 길게 하여 디지털 카메라로 촬영하였다.

이 버너는 폭이 480mm인 정사각형 단면의 유면체 중심에 위치하고 있고, 실내 공기 흐름에 의한 영향을 최소화하기 위해 고온용 직물을 3면에 설치하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 비례제어밸브 유속측정

비례제어밸브의 유량특성을 파악하기 위하여 연료관 출구의 중심속도를 열선유속계로 측정하였다. LPG 대신 공기를 이용하였고, 연소를 시키지 않는 조건이기 때문에 실제의 연소상황에서와 다소 차이가 있을 수 있으나 LPG와 공기의 밀도차가 1.5배 정도이고 밸브와 연료관 출구간의 거리가 120mm로 짧기 때문에 유동특성에 큰 차이는 없을 것으로 생각된다. 이 시험에서는 비례제어밸브의 주요 운전 변수인 듀티비, 주파수, 솔레노이드 인가전압, 유량 등이 출구속도에 미치는 영향을 조사하였다. 측정점은 노즐 팁에서 3mm 떨어진 지점의 축 중심이다.

각 조건에 대한 유속측정 결과를 Fig. 4 ~ Fig. 8에 도시하였다. 측정결과를 보면 크게 구분해서 유속이 싱글 피크를 나타내는 경우와 더블 피크를 나타내는 경우로 나뉜다. Fig. 5와 같은 싱글 피크 펄스가 Fig. 1에 도시한 이상적인 진동연소기용 제어밸브의 연료유량특성과 가깝다고 할 수 있으나 이 경우도 연속유량기간의 유량이 일정하지는 않다. Fig. 4 ~ Fig. 8의 연속유량 구간을 보면 거의 속도가 0인 구간이 상당기간 존재한다. 이 구간의 유량은 화염의 안정성과 관련하여 Fig. 1의 이상적인 경우와 같이 유량의 조절이 가능한 것이 바람직하겠지만 현 비례제어밸브의 경우 이와 같은 이상적인 연속유량 제어는 되지 않는 것으로 나타났다.

유속 형태 중에서 두드러지게 더블 피크 형태를 보이는 경우는 Fig. 4의 듀티비 80%의 L 및 S 조건(8Hz), Fig. 7의 L조건(14Hz), Fig. 8의 L조건(20Hz) 등이다. 여기에서 L 및 S 조건은 뒤의 Fig. 9에서 나타낸 조건이다. 각 그림의 더블 피크 형상도 각기 다른 형태를 나타낸다. 이들 더블 피크 간의 시간은 모두 약 30ms 정도로 나타나는데 솔레노이드 운동자, 탄성체, 운동자 복귀스프링, 스톱퍼 등으로 이루어진 진동시스템의 주 진동모드가 이 값과 관련된 것으로 생각된다. 비례제어밸브의 솔레노이드 운동자의 진동은 주파수, 듀티비, 인가전압에 따라 정해지는 솔레노이드 힘과 솔레노이드 고정자와 연결되어 있는 탄성체, 운동자복귀스프링, 스톱퍼 등에 의해 영향을 받기 때문에 밸브 설계시 이러한 것들을 어떻게 최적화하는가에 따라 유량특성이 바뀔 수 있다.

이 밸브 특성의 최적화는 실제의 진동연소기에 적용하여 NOx 배출특성을 조사하면서 이루어져야 하며, 본 연구에 이용한 밸브의 경우 이와 같은 최적화는 거치지 않은 것이다.

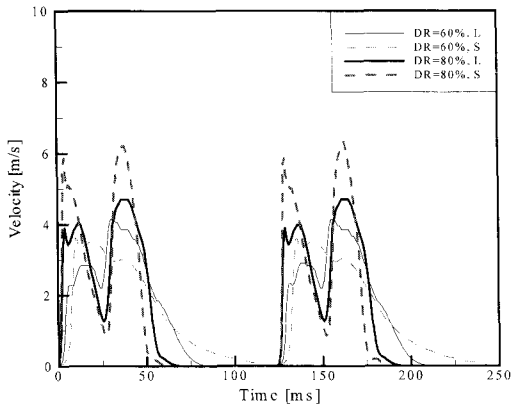


Fig. 4 Velocity profiles at the nozzle exit : 8Hz, 1.67/min

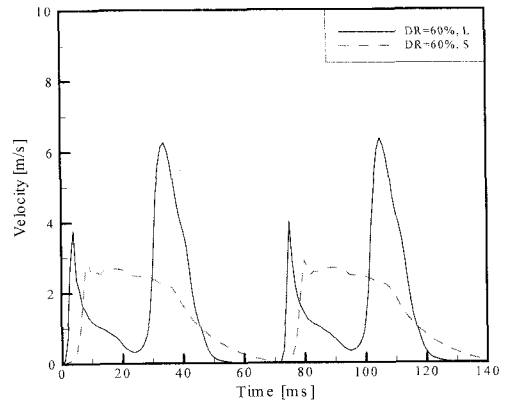


Fig. 7 Velocity profiles at the nozzle exit : 14Hz, 1.67/min

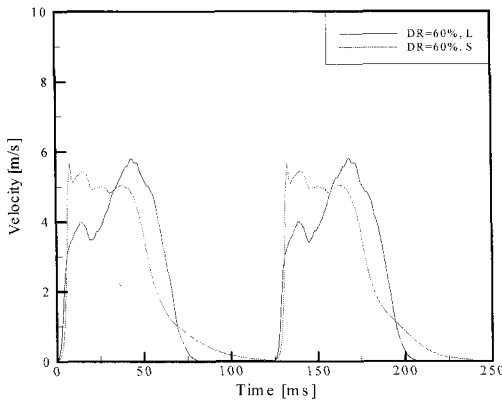


Fig. 5 Velocity profiles at the nozzle exit : 8Hz, 2.6/min

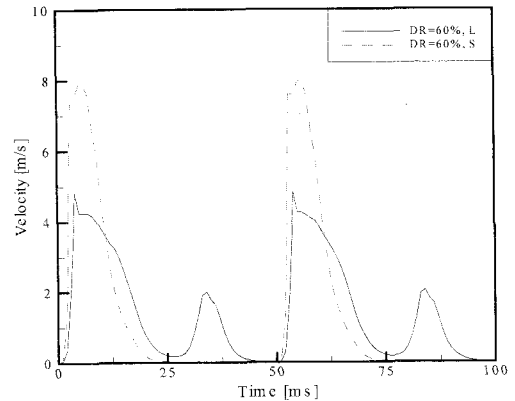


Fig. 8 Velocity profiles at the nozzle exit : 20Hz, 1.67/min

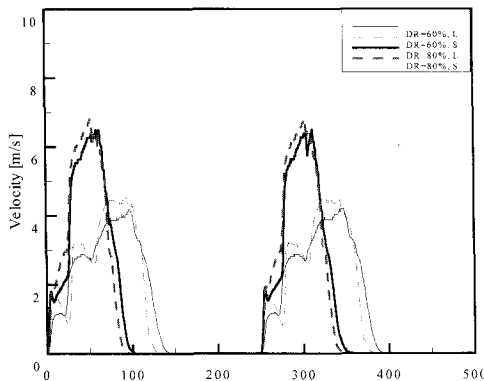


Fig. 6 Velocity profiles at the nozzle exit : 4Hz, 1.67/min

다른 조건은 같고 유량만 다른 경우인 Fig. 4의 듀티비 60%의 L 및 S 조건의 결과와 Fig. 5의 결과를 비교해 보면 유속변화 패턴은 비슷한 것으로 나타났다.

위의 속도측정 결과를 보면 Fig. 1과 같은 직각과 형태의 유량 변화와는 다소 차이가 있으나 급격한 유량변화 패턴이 얻어짐을 알 수 있고, 이러한 특성으로 인해 이 비례제어밸브를 진동연소기에 적용한 실험에서 충분한 진동연소 효과가 나타남을 알 수 있었다.

3.2 화염 형태 관찰 결과

앞서 특성을 측정된 비례제어밸브를 연소기에 장착하여 화염형태를 고속카메라와 디지털 카메라를 이용하여 측정하였다. 사이클 과정에서 화염이 변화해 가는 형태를 관찰하기 위한 사진은 고속카메라를 이용하여 1,000fps로 찍었으며 이

때의 노출시간은 1ms이다. 여러 사이클을 시간에 대해 평균한 화염은 노출시간을 1초로 길게 하여 디지털 카메라로 촬영하였다.

본 연구에 이용한 진동연소버너의 경우 비례 제어밸브를 쓰고 있기 때문에 주파수, 듀티비, 솔레노이드 인가전압, 밸브 상단 압력 등 제어변수가 많다. 이러한 제어변수에 따라 연료유량과 펄스유량, 연속유량, 펄스지속기간 등이 변하게 되며, 본 연구에서는 이러한 변수들의 영향을 조사하였다.

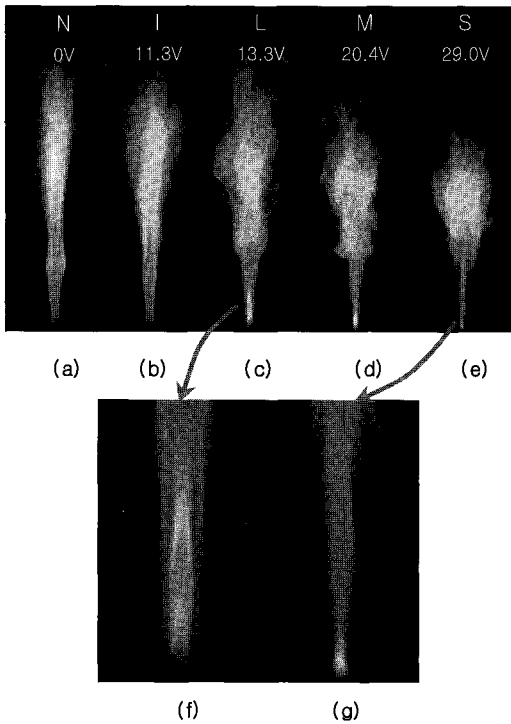


Fig. 9 Variations of time-averaged flames according to the solenoid voltages in the oscillating combustion burner: 8Hz, DR=60%, 1.67l/min

진동연소기에 의한 시간평균화염의 변화패턴을 관찰하기 위해 평균유량 1.67l/min($Re=1590$), 8Hz, 60% 듀티비 조건은 일정하게 하고 솔레노이드 인가전압만을 변화하면서 시험을 행하였다. Fig. 9는 이 때의 시험 결과이며 솔레노이드 인가전압에 따라 Fig. 9 (a) N(정상상태), (b) I(펄스효과 미약), (c) L(펄스효과 소), (d) M(펄스효과 중), (e) S(펄스효과 대) 등의 5단계로 구분하였다. Fig. 9 (f)와 (g)는 (c)와 (e) 화염과 각각 같은 조건에서 노즐 팁 부근에서의 화염을 확대 촬영한 것이다. 정상상태의 화염의 경우 노즐 팁

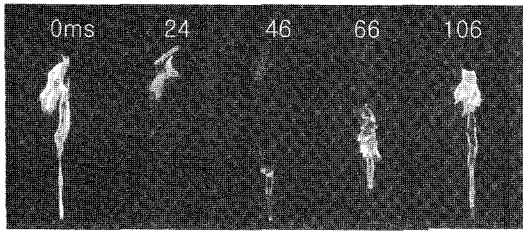
에서 약12cm 부근에서 불안정성이 커져 흔들림을 보이다가 다시 안정화된 후 화염하류에서 불안정성이 심화되면서 주름화염의 특성을 보인다.

솔레노이드 인가전압을 증가시켜 가면 11.3V(조건)에서 펄스 효과로 인해 화염에 변화가 나타나는데 화염하류부에서의 화염 변동이 정상연소에 비해 심해진다. 전압을 13.3V 정도로 높이면 노즐팁 부근의 축 중심에 화염이 형성되고, 노즐팁에서 14cm 되는 곳에서 폭이 갑자기 확대된다. 이와 같이 갑자기 화염영역이 확대되는 이유는 순간화염 사진 고찰 부분에서 언급하도록 하겠다. 전압을 더 높여 가면 노즐 팁 근처의 화염 길이는 점점 짧아지고, 상류부에서 화염체트의 단면은 거의 증가하지 않은 채 1자형으로 진행하다가 L조건과 비슷한 위치에서 급격히 화염폭이 넓어지고 화염변동이 심화된다.

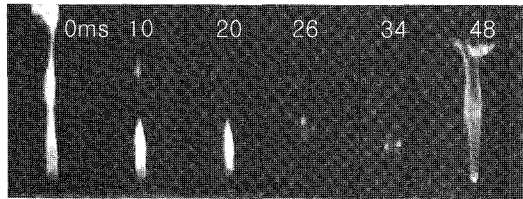
노즐팁 근처 축 중심에 형성되는 화염은 연료유량이 적은 연속유량 구간에 생성되는 것으로 솔레노이드 인가전압을 높이면 같은 듀티비라 하더라도 펄스유량기간이 짧아지고 연속유량이 적어져 연속유량 기간의 화염길이가 짧아진다. 화염길이는 진동연소 효과가 미약한 경우에는 정상조건에서의 화염길기와 비슷하고 강한 경우에는 화염길이가 다소 짧아진다.

이와 같은 화염변화 특성은 고속카메라로 찍은 일련의 사진에서 잘 관찰할 수 있다. 8Hz, DR=60%이고, L과 S인 조건에서 각각의 진동연소 사이클 과정을 고속카메라로 찍은 것을 Fig. 10에 나타냈는데 Fig. 10(a)와 (c)는 화염전체를 찍은 것이고 Fig. 10(b)와 (d)는 노즐 팁 부분만을 확대 촬영하여 연속유량기간만을 나타낸 것이다. L조건인 Fig. 10(a)와 (b)를 보면 0ms에서 펄스유량이 거의 끝나면서 화염의 중간 부분이 끊어지고 있고, 26ms까지는 노즐 팁 부근에 화염이 짧게 형성되는 것을 볼 수 있다. 이 짧은 화염이 형성되는 구간에서도 처음에는 진한 주황색화염에서 점차적으로 농도가 열어지다가 말기에는 청색 화염도 일부 나타나는데, 이는 연료유량의 감소에 따라 나타나는 현상이다. 34ms에서는 펄스가 다시 시작되면서 화염이 빠르게 진행해가는 것을 알 수 있다.

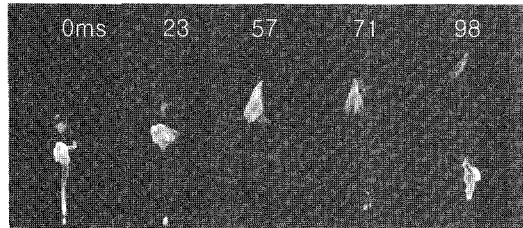
펄스기간에는 긴 화염이 형성되는데 화염선단이 버섯머리 같은 형태를 나타낸다. 이는 펄스에 의한 연료제트가 진행할 때에 화염선단 저항으로 인해 후속제트가 계속 화염선단을 따라잡기 때문이다. S조건에서의 시험결과인 Fig. 10(c)와 (d)를 보면 L조건과 같은 듀티비임에도 불구하고 연속유량기간이 훨씬 길게 나타나고 이 기간의 화염길기도 작음을 알 수 있다. 펄스유량이 끝나는 부근의 화염형상은 L조건과 마찬가지로 버섯모양의 형태를 띠고 있다.



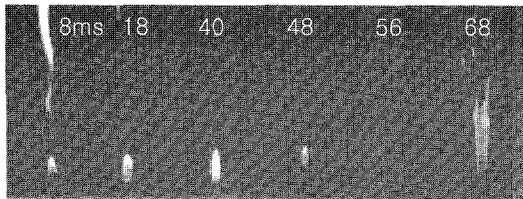
(a) Series of flames in L condition



(b) Series of flames near the nozzle during the continuous flow period in L condition



(c) Series of flames in S condition



(d) Series of flames near the nozzle during the continuous flow period in S condition

Fig. 10 Series of flames: 8Hz, 1.67l/min, DR=60%

Figure 11은 평균유량이 1.67l/min($Re=1590$)인 경우에 대해 여러 주파수 및 듀티비에서 슬레노이드 인가전압이 화염길이에 미치는 영향을 도시한 것이다. 이 그림에서 세로축의 L_f/L_s 는 각 조건에서의 화염길이(L_f)를 같은 평균유량 조건에서의 정상화염길이(L_s , 펄스가 가해지지 않은 상태에서의 화염길이)로 노말라이즈한 것이다. 여기서 화염길이는 1초간의 화염을 누적하여 측정하는 디지털 카메라에서 얻은 결과를 분석한 것이다. 진동연소시 화염길이는 펄스효과가 큰 S조건으로 갈수록 정상상태 화염길이에 비해 대체적으로 짧아지는 경향을 보인다. 특히 8Hz, 80% 듀티비의 경우는 약 30%정도 줄어든다. 4Hz, 듀

티비 60%인 경우는 큰 변화가 없는 것으로 나타나는데 주파수가 낮을수록 펄스유량기간 즉, 제트가 지속되는 기간이 길기 때문으로 생각된다. 진동연소시 화염길이가 조건에 따라 다소 불규칙적인 형태를 갖는 것은 앞서 제시한 노즐 출구 유속측정 결과가 조건에 따라 변화가 큰 것과 상관된다고 볼 수 있다.

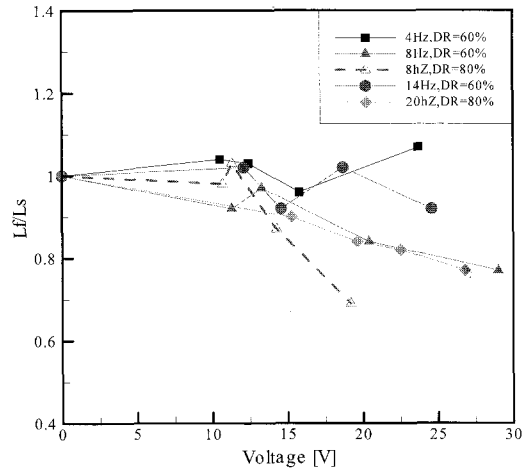
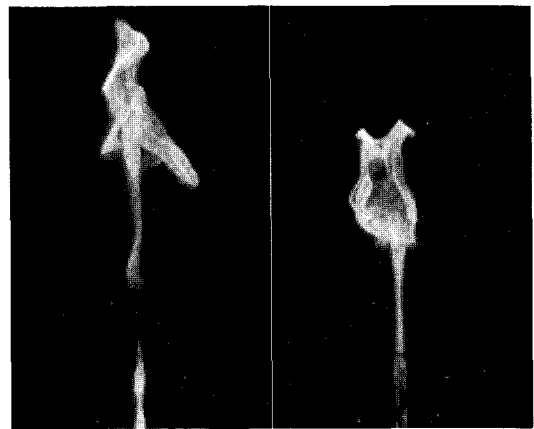


Fig. 11 Normalized flame lengths at the various conditions: 1.67l/min



(a) DR=70% (b) DR=90%

Fig. 12 Photos of mushroom type flames : 8Hz, 1.67l/min

진동연소 화염의 대표적인 특성은 Fig. 12와 같은 버섯모양의 화염이 생성된다는 것이다. 이 화염의 대표적인 생성 과정을 Fig. 13에 나타냈는데 펄스유동이 시작되면 빠른 속도로 제트가 분출되는데 화염제트의 선단은 저항이 커서 속도가 느려지기 때문에 후속제트가 이를 따라 잡으면서 진행해 간다. 따라서 제트의 선단에는 연료가

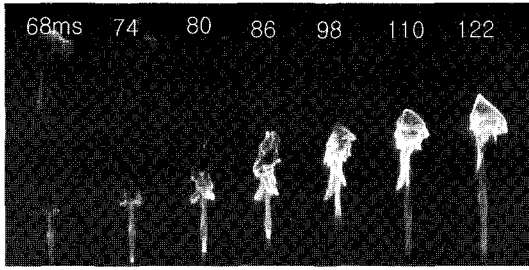
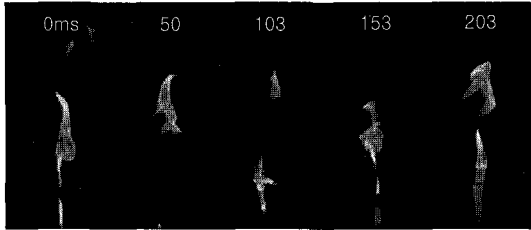
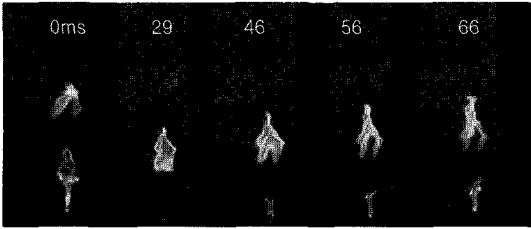


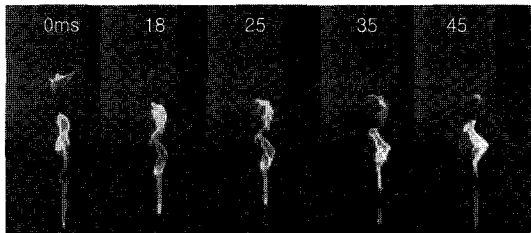
Fig. 13 Formation procedure of the mushroom type flames: 8Hz, DR=70%, 1.67l/min



(a) 4Hz



(b) 14Hz



(c) 20Hz

Fig. 14 Series of flames in the various frequencies: S, DR=60%, 1.67l/min

모이면서 버섯머리 같이 넓어지게 된다. 버섯머리 같은 부분은 Fig. 12와 같이 주름진 곡면의 화염쉬트가 얹혀 있는 형상인 주름상 화염구조를 나타낸다.

본 시험의 경우 분출되는 제트의 평균 레이놀즈수가 수천이하이기 때문에 유체역학적 특성시간이 반응특성시간보다 훨씬 긴 경우로 주름상 화염모델의 적용에 적합한 형태이고, 실제로 관찰된 화염도 주름상 화염구조를 갖고 있다.

가진 주파수를 변화시켰을 때의 각 조건에서

의 전형적인 화염형태를 Fig. 14에 나타냈다. 각 조건에서의 첫 번째 사진은 펄스유량이 끝나고 연속유량이 시작되는 시점인데 4Hz와 8Hz(Fig. 10(c))에서는 이전 사이클에 형성된 화염퍼프는 다 연소되고 보이지 않는다. 사진에서 윗부분에 나타나는 작은 화염덩어리는 아래 부분의 화염퍼프에서 떨어져 나온 것이다. 4Hz와 8Hz의 경우 펄스유량기간이 상대적으로 길기 때문에 펄스 기간에 분출되는 제트가 유속변화가 큰 부분에서 단절되기도 한다. 주파수가 빠른 14Hz와 20Hz의 경우는 각각 2개와 3개의 퍼프가 공존한다.

본 시험에 이용한 비례제어밸브의 경우 정해진 주파수에서 솔레노이드의 힘을 조절하는 방법은 듀티비와 인가전압이다. 따라서 서로 다른 듀티비라도 인가전압을 조절하면 솔레노이드에 걸리는 힘은 비슷한 패턴으로 할 수 있다. 같은 주파수에서 듀티비가 클수록, 인가전압이 높을수록 솔레노이드에 걸리는 힘은 높아진다. Fig. 11에서 8Hz의 듀티비60%와 80%를 비교해 보면 듀티비가 클수록 낮은 전압에서 비슷한 화염이 형성됨을 알 수 있다.

4. 결론

진동연소형 저NOx 버너에 이용할 수 있는 비례제어밸브를 개발하여 각종 운전변수들에 따른 노즐출구 유속변화특성을 조사하였고, 이를 시험용 동축버너에 적용하여 진동연소 화염형태를 조사하여 다음과 같은 주요 결과를 얻었다.

- 1) 솔레노이드와 탄성체를 이용하여 비례제어밸브를 개발하였으며 주파수, 듀티비, 솔레노이드 인가전압 등을 변환하여 진동연소 형태를 다양하게 변화시킬 수 있었다.
- 2) 비례제어밸브에 의한 노즐 출구의 유속은 급격한 속도증가 및 감소가 가능하나 솔레노이드 진동자의 동적특성과 관련한 더블 피크 패턴을 보이는 경우도 있었다.
- 3) 진동연소에 의한 화염길이는 진동연소효과가 강할수록 짧아졌다.
- 4) 진동연소시의 대표적인 화염형태는 버섯모양이며 버섯머리부분에서는 왜곡이 심한 주름상 화염구조를 갖고 있었다.
- 5) 진동연소시 연속유량만 있는 구간에는 노즐 팁 부근에 극히 짧은 화염이 생성되었다..

후기

이 연구는 2004년 한국과학재단 지역우수과학자지원사업을 통해 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- [1] H. Yoshida and M. Saito, "Super-mixing combustion enhanced by resonance between micro-shear and acoustic excitation," *International Journal of Heat and Fluid Flow* 22, 2001, pp. 372-379.
- [2] C. Poppe, S. Sivasegaram and J. H. Whitelaw, "Control of NOx emissions in confined flames by oscillations," *Combustion and flame*, Vo. 113, 1998, pp. 13-26.
- [3] 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, 1995, pp. 395-406.
- [4] T. K. Kim, J. Park, H. D. Shin, "Mixing Mechanism near the Nozzle Exit in a Tone Excited Non-Premixed Jet Flame," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 89, 1993, pp. 83-100.
- [5] T. Pinder and A. Atreya, "Experimental and Computational Investigation of Dynamic Control Strategies for Nonpremixed Flames," *Proceedings of the Third Joint Meeting of the U.S. Sections of the Combustion Institute*.
- [6] J. A. Lovett and S. R. Turns, "The Structure of Pulsed Turbulent Nonpremixed Jet Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.94, 1993, pp. 193-217.
- [7] H. Johari and Vahid Motevalli, "Flame Length Measurements of Burning Fuel Puffs," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.94, 1993, pp. 229-244.