

< 논문 >

다수 상호작용 화염의 공해배출물 특성

이 병준* · 김진현*

(2005년 1월 17일 접수, 2005년 3월 24일 심사완료)

Effect of Flame Interaction on the NO Emission

Byeong-Jun Lee and Jin Hyun Kim

Key Words: Interaction(상호작용), Multiple Jet Flame(다수 화염), NO(일산화질소)

Abstract

It has been reported that the interacting multiple jet flames of propane fuel are not extinguished even at the choking velocity at the nozzle exit if eight small nozzles are arranged along the imaginary circle of 40 ~ 72 times the diameter of single nozzle. In this research, experiments were conducted to know the NO and CO emission characteristics of the interacting flames. Measurements along the centerline of the flame revealed that decrease in CO concentration was followed by the NO decrease and O₂ increase. It was found that interacting flame emitted less NO than that of similar area single jet flame. Also, NO emission of partially premixed interacting flame was decreased up to 17% of that of non-premixed multiple jet flame. Though the mechanism of the NO reduction was not clear from this experiment, it's been shown that partially premixed multiple jet flames could be used to achieve clean and highly stable combustion.

기호설명

- D : 노즐 직경
- Q_{bo} : 화염날림 유량 [ml/min]
- Q_{total} : 노즐에 공급되는 연료의 총유량 [ml/min]
- S : 인접 노즐사이의 거리

1. 서론

고부하에서도 화염날림이나, 화염진동이 없으며, NO_x 와 CO 등의 공해물질을 배출하지 않는 연소기를 개발하는 것은 연소 연구 분야의 큰 목표 중에 하나이다.

여러개의 노즐을 사용하여 화염의 길이를 줄이

면서 화염을 안정화시키는 방법이 최근에 소개되고 있다.⁽¹⁻⁸⁾ 다수노즐에서 형성된 화염들은 서로 영향을 주고받는 화염상호작용을 초래하게 되어 단일 화염과는 다른 특성을 나타내게 된다.

화염의 상호작용은 노즐 형상, 노즐 직경, 노즐 간의 거리, 연료 유속 등에 따라 열 및 물질전달, 운동량전달에 영향을 주어 화염의 기울어짐, 화염의 합류 및 화염길이의 변화 등의 가시적인 영향뿐만 아니라, NO_x, CO, O₂ 농도분포, 온도분포 등에 영향을 미치게 된다. 또한, 화염의 상호작용은 단일 화염에서보다 화염이 꺼지는 유량, Q_{bo},을 증가시켜 화염을 안정화시키는 효과가 있다.⁽⁴⁻⁸⁾

Lee 등⁽⁹⁾은 동일 직경의 노즐 5개를 선형으로, 5개를 diamond 형으로, 4개를 cross 형으로 배열한 경우에 대하여 연구를 수행하였다. Q_{bo}이 노즐의 수와 배열에 따라 영향을 받으며, 5개의 노즐을 diamond 형태로 노즐직경의 28~32배로 노즐간격을 유지하면 화염날림의 유량이 동일면적의 단일 노즐보다 3.3배 증가함을 보였다.

상호작용을 이용하여 프로판 비예혼합화염의

† 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부
 E-mail : bjlee@yu.ac.kr
 TEL : (053)810-3526 FAX : (053)810-4627
 * 한국기계연구원 복합재료그룹

화염날림 유량을 더욱 증가시키기 위하여, 9개까지의 노즐을 사용하여 노즐의 배열형태, 노즐수, 유량 및 노즐간격을 변화시킨 실험⁽⁷⁾으로부터, 중앙부에 노즐 없이 8개의 노즐을 원형 혹은 matrix 형태로 배열한 경우가 중앙부에 노즐이 없는 경우에 비하여 더 안정함을 보였다. 8개의 노즐을 원형으로 배열한 경우에 노즐간격을 노즐직경의 15~28로 하면, 노즐 출구 유속이 210m/s까지도 화염날림이 발생하지 않음을 보였다(동일면적의 단일노즐은 31m/s에서 화염날림 발생). 또한 이 실험에서 다수노즐에 의하여 형성된 부상화염의 기저부는 이론 당량비의 영역이 아니며, 다수노즐에서 형성된 확산화염의 안정화는 기연가스의 재순환이 중요한 역할을 함도 보였다.

비에혼합 화염에 대한 실험을 NOx 저감에 더 효과적일 수 있는 부분예혼합 화염으로 연장한 실험⁽⁸⁾에서, 프로판 부분예혼합 화염은, 중심부에 노즐이 있는 원형 노즐배열을 S/D=15-25로 하고, 중심부 노즐에는 5%의 연료를 공급하고, 외부노즐에는 연료/공기의 혼합기를 공급하는 경우에 화염날림 유량이 210m/s 이상임을 보였다.

프로판에 비하여 완전연소에 필요한 공기량이 40% 밖에 되지 않는 메탄화염은, 프로판 부분예혼합 화염의 경우와 유사하게 동일한 양의 메탄을 공급하는 8개의 노즐을 원형배열하고, 배열 중앙의 노즐에 소량의 메탄을 공급하는 경우에 외부노즐의 출구유속이 400m/s에서도 화염날림이 발생하지 않았다.⁽⁹⁾

이러한 지금까지의 연구는 연료와 배열에 따른 화염날림 유속을 증가시키기 위한 연구들로 화염의 안정성확보에 관한 것이었다. 이러한 방법으로 개발된 안정한 연소기도 배출물 특성이 불량한 경우에는 사용이 불가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 상호작용 화염의 배출물 특성에 관하여 살펴보고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용된 실험장치는 참고문헌 8에 사용한 것과 유사하므로 개략적으로 설명하기로 한다(Fig. 1참조).

연료(LPG)와 공기는 각각의 질량유량계(MKS Co.)에 의해 유량이 조절된 후 유량분배기에서 혼합되어, 유량분배기 선단부에 등원주각으로 놓

인 개별노즐(내경 0.31mm, 길이 300mm)로 공급된다. 개별노즐은 미리 천공된 노즐 배열형상을 가진 중앙부 노즐(외경 36mm)에 삽입되어 수직이 유지된다. 중앙부 노즐의 선단면에는 내경 36mm이고 외경을 달리하는 와셔형태의 판을 부착하여, 외부로 공급되는 공기에 의한 재순환 영역의 영향을 파악할 수 있도록 하였다. 본 실험에서 사용한 와셔형태 판의 외경은 51mm이다. 노즐은 중앙노즐의 윗면으로 6mm 돌출되게 설치하였다.

농도측정과 동축류 화염에 관한 연구를 위하여 외경 94mm인 동축류 버너를 사용하였다. 외부로 공급되는 공기의 균일한 출구 속도를 얻기 위하여 셀의 크기가 1mm x 1 mm인 두께 50mm의 허니컴, 직경 2mm의 스테인리스 구슬층과 철망을 사용하였다.

또한 외부공기 유입의 차단과 가시화를 위해서 동축류 버너 외부에 길이 60cm의 석영관을 설치하였다.

연소중에 발생하는 공해물질을 측정하기 위해서 화염 중앙 상부에 sampling probe를 설치하였다. 프로브에 의해 화염에 미치는 영향을 줄이기 위하여 내경 4mm의 석영관을 'ㄱ' 형태로 구부렸으며, 그 끝을 급격히 축소시켜 내경 0.5mm의 기체흡입구를 만들었다. 구부린 부분으로부터 기체흡입구까지는 10cm 이며, Fig. 1에서 프로브의 수평부분은 물로 냉각시켜 반응을 동결시켰다. 흡입된 배출가스는 수분을 제거한 후 NOVA사의 CO / CO₂ / O₂ / NOx 분석기를 사용하여 분석하였다. NO의 값은 동일한 산소농도에 대한 값

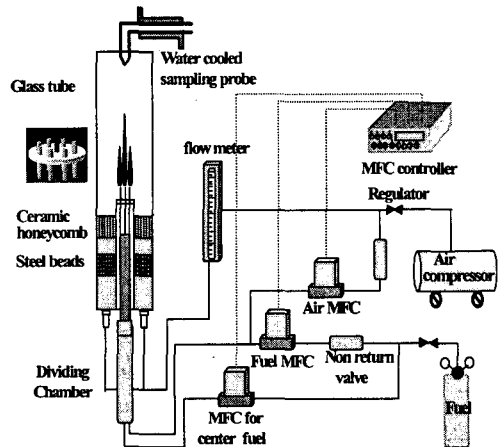


Fig. 1 Experimental apparatus

으로 변환시키기 위하여 5% O₂로 변환하였다. 원형으로 배열한 프로판 화염의 노즐 배열(Fig. 1의 좌상단 그림참조)과 부분 예혼합 정도에 따른 NO, CO 및 CO₂ 배출 특성을 파악하기 위하여 농도 및 온도측정을 수행하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 NO 생성특성 및 온도측정

3.1.1 비예혼합 상호작용 화염의 NO 생성특성

중앙부에 노즐을 배치하지 않고 원형으로 8개의 노즐을 배열한 경우의 NO 생성량을 S/D의 변화와 전체유량의 변화에 따라 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. 본 실험은 동축류로 공기를 흘리지 아니하고, 버너 외부에 석영관을 씌우지 않은 상태에서 노즐 출구로부터 50cm 위의 위치에서 sampling하여 NO를 측정하였다. 단일노즐에서의 NO 배출특성과 비교하기 위하여 직경 0.97mm 노즐(단면적이 9개 노즐인 경우와 근사.)의 경우도 Fig. 2에 나타내었다. 단일화염의 NO 생성량은 유량증가에 따라 증가하는 경향임을 볼 수 있다. 이는 난류영역에서 유량증가에 따라 화염길이의 증가는 미미하므로, 체류시간이 감소하게 되어 NO_x가 감소 할 수 있으나, 복사손실이 일어날 시간도 줄어들어 화염의 온도가 증가하여 NO_x의 생성이 증가하는 것에 기인한다.⁽¹⁰⁾

상호작용화염의 NO_x 생성은 유량증가에 따라 서서히 증가하다가 노즐이 choking 되는 유량 근처에서 완만해지는 S형 곡선을 나타냄을 볼 수 있다. 0.97mm 단일노즐의 경우에 화염날림으로 인하여 1200ml/min 이후에서는 NO의 측정이 불가능하여 고유량에서 상호작용화염과 비교하기가 곤란하나, 기울기로 볼 때 단일 노즐에 비하여 S/D가 큰 경우에 상호작용화염의 NO의 배출이 적음을 추론할 수 있다. 이는, 상호작용으로 화염에 공급되는 공기량 결핍으로 생성된 CO가 산화되는 과정에서 O원자를 소비하게 되어 NO의 형성을 방해하는 것에 기인한다⁽⁴⁾고 알려져 있다. 이에 따르면 S/D가 증가할수록 공기가 화염으로 삽입될 공간이 넓으므로 공기량의 결핍이 줄어들어 NO_x의 생성이 늘어날 것으로 예견되나, NO 배출이 감소함을 볼 수 있다. 이는 NO_x의 감소

가 공기량 결핍만으로 설명할 수 없는 부분으로 이에 대한 향후 연구가 필요하다.

3.1.2 부분예혼합 상호작용 화염의 NO 생성특성

Fig. 3은 동축류에 공기를 공급하고, 외부노즐에 연료(혹은 연료/공기 혼합기)를 공급하고, 중심노즐에는 외부노즐 하나에 공급되는 연료의 40% 만을 공급한 경우의 NO 생성량을 당량비의 변화와 S/D의 변화에 대하여 나타내었다. 실험에서 sampling은 동축류로 공기를 공급하고, 외부공기의 영향을 막기위하여 화염외부에 석영관을 씌우고, 노즐출구에서 후류로 50cm 떨어진 위치에서 하였다. 그림의 가로축은 공급하는 연료만의

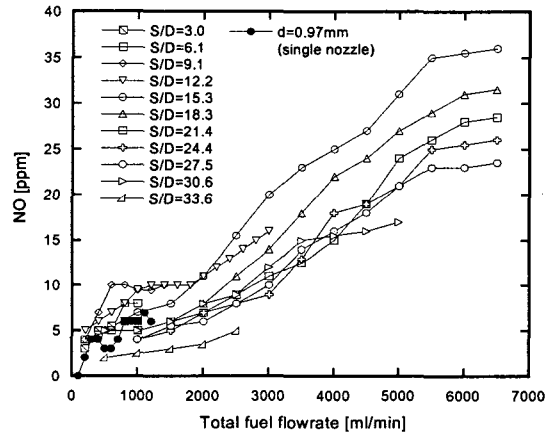


Fig. 2 Effect of nozzle separation distance on the NO emission for the nonpremixed case

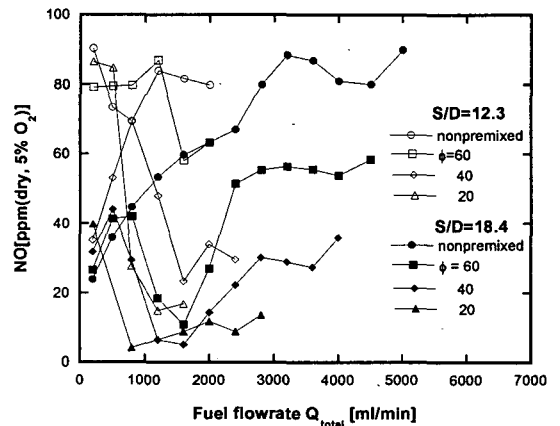


Fig. 3 Effect of premixedness and nozzle separation distance on the NO emission

총량으로 연료의 발열량에 비례하는 수치이다. 통상 NOx는 NO와 NO₂가 주성분이나, 본 실험에서 sampling하는 부분이 고온영역이고 sampling 후 급속냉각을 시켜 반응을 동결시키므로, 저온에서 활성화되어 생성되는 NO₂의 생성은 무시할 정도로 간주하였다. 노즐로 공급되는 공기량의 증가(당량비 감소)에 따라 NO의 생성은 급격히 감소함을 볼 수 있다. 주어진 S/D에 대하여 비예혼합 화염의 NO는, 전술한 바와 같이 유량증가에 따라 대체로 증가함을 볼 수 있다. 부분예혼합 화염의 NO 생성은 유량증가에 따라 증가한 후 감소하였다가 증가한 후 일정해지는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 유량증가에 따른 체류시간 감소, 복사손실 증가에 의한 화염온도감소 및 유동장 변화에 따른 혼합과 반응 메카니즘의 변화등 NO 생성에 미치는 제 요인의 상호작용에 의한 것으로 추정된다. 그러나 이들 중에서 체류시간의 감소와 화염온도 감소의 요인은 비예혼합화염과 크게 상이한 부분이 없으므로 혼합 및 반응에 영향을 미치는 화학종의 변화가 클 것으로 예측된다.

비예혼합화염에 공기를 첨가함에 따라 NO의 생성은 급격히 감소함을 볼 수 있다. 즉, 최대 연료공급유량 근처에서 비예혼합인 경우 NO는 90ppm 가량 배출되지만, 당량비가 60인 경우는 55ppm, 20인 경우는 15ppm으로 줄어들어 약 83%의 NO가 줄어들음을 볼 수 있다. 기존에 알려진 NO의 저감 기술⁽¹⁰⁾은 농후-회박의 상태로 운전하는 다단연소법, 물의 분사나 연소가스 재순환에 의한 화염온도 저감법, 산소연소법, 전체연료의 약 15%를 연료회박의 주연소 영역의 후류에 공급하는 재연소법, 연소가스에 암모니아, 요소, 시안산같은 질소를 함유한 첨가제를 분사하는 선택적 비촉매저감법(SNCR) 및 선택적 촉매저감법(SCR) 등이 있다. 이러한 방법들과 본 장치의 NO 저감 메카니즘을 비교하면, 기연가스가 재순환되기는 하나 그 온도가 낮지 않기 때문에 연도가스 재순환에 의한 저감과는 일치하지 않으며, 질소함유물질을 분사하거나 촉매를 사용하지 않으므로 SNCR이나 SCR과는 일치하지 않으므로 내부적인 재연소 혹은 다단연소가 일어난 것으로 추정된다. 즉, 화염하부 영역에서의 연소는 전체

적으로 약간 과농한 상태의 연소를 유지하다가, 화염의 면적이 급격히 넓어지는 부분에서 주연소가 일어나고, 주연소영역 이후에도 연료가 공급되어 생성된 NO가 탄화수소와 HCN과 같은 탄화수소 중간생성물과 반응하여 저감되는 것으로 추론된다. 이 부분에 대한 연구는 향후 필요하다. 전술한 NO 저감법에 비하여 화염의 상호작용을 이용하는 본 장치는 운전방법이나 장치가 간단하고 기타 물질을 분사하거나 촉매가 필요 없는 장점이 있다.

첨가하는 공기의 양이 이론당량비에 비하여 극히 적은 양이므로 첨가하는 공기량의 증가는 이론당량비의 이동이 되어 NO가 증가하여야하나 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 화염이 부상되어있고 화염 밑면까지 외부공기가 유입되어 화염이 형성되고 유지되므로, 공급되는 소량의 공기 양으로 화염의 특성을 논할 수 없기 때문인 것으로 사료된다.

3.1.3 화염 중심선에서의 화염온도와 주요 화학종 부분 예혼합 정도와 노즐 배열에 따른 NO의 생성 특성을 살펴보기 위하여 전체배열의 중심선을 따라가면서 온도, NO, CO, CO₂ 및 O₂의 양을 측정하였다.

sampling probe 끝의 외경이 커서 화염에 영향을 미치기 때문에 노즐출구로부터 50mm지점에서 하류로 농도측정 프로브를 이송하며 농도측정을 수행하였다. 외부 공기의 유입을 막기 위한 석영관은 프로브의 이송을 불가능하게 하므로 제거한 후 실험을 수행하였다. Fig. 4는 온도와 NO농도의 변화를 나타내며 Fig. 5는 CO와 O₂ 농도의 변화를 나타낸다.

비예혼합 화염의 경우, 8개의 노즐을 원형배열하고 중앙에 노즐을 사용한 경우가 중앙노즐을 사용하지 않는 경우에 비하여 화염의 온도가 높게 나타났으며 이에 따라 NO의 생성도 증가하였다. 또한 첨가되는 공기의 양이 많을수록 최고 온도는 증가하나 화염의 온도가 급격히 줄어드는 부분의 높이가 감소하고 NO의 생성도 감소함을 볼 수 있다. 이러한 급격한 온도의 감소는 산소의 증가와 관련이 있다(Fig. 5 참조). NO의 생성

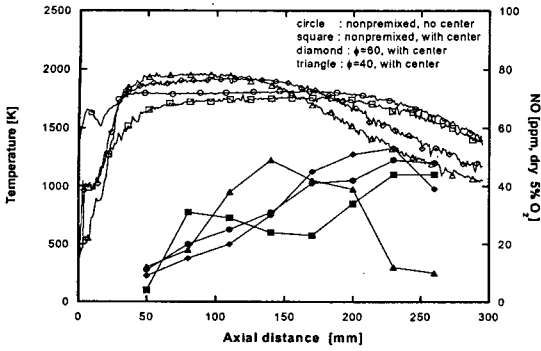


Fig. 4 Temperature and NO profiles along centerline of the flame as functions of equivalence ratio and number of nozzles when $S/D=18.4$ and $Q_{F,total} = 3700\text{ml/min}$

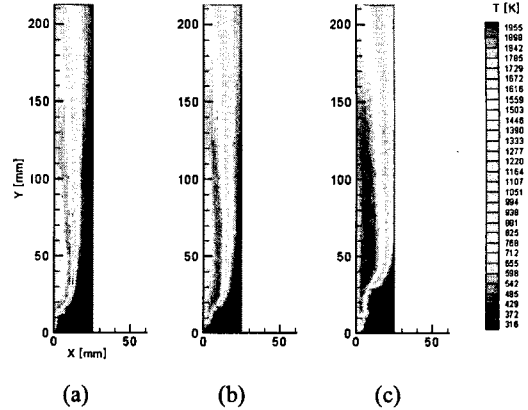


Fig. 6 Effect of fuel flowrate on the temperature profiles when $S/D = 18.3$, $\phi=60$ and total fuel flowrate of the outer nozzles is (a) 1000, (b) 1500, (c) 3000 ml/min

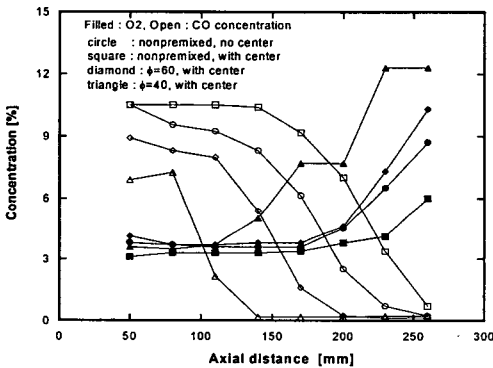


Fig. 5 CO and O₂ concentration profiles along centerline of the flame as functions of equivalence ratio and number of nozzles when $S/D=18.4$ and $Q_{F,total} = 3700\text{ml/min}$

은 화염온도가 높은 부분예혼합 화염에서 부분적으로 높게 나타나 반응이 진행되면서 NO가 감소함을 볼 수 있다. 부분예혼합의 경우에 CO가 급속히 감소하기 시작한 후에, NO가 감소하며 산소 농도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 CO의 감소와 NO의 생성과 환원경향 및 산소농도의 변화를 비교하면 산소결핍에 의한 CO와 NO의 경쟁으로 NO가 덜 생성된다는 상호작용화염에 대한 설명⁽⁴⁾만으로는 본 실험을 설명할 수 없음을 알 수 있다. 이 부분에 대한 향후 이론적, 수치해석적 연구가 필요하다.

화염온도가 최고점을 지난 후 일정한 영역에서 CO의 농도는 화염온도가 가장 높은 당량비 40의 경우가 가장 적음을 볼 수 있다. CO의 평형농도는 고온에서 온도증가에 따라 증가하므로, 본 상호작용화염의 경우 CO가 화학평형에 있지 않음을 의미한다. NO를 줄이는 다단연소에서는 초기에 과농한 상태로 연소를 시켜 CO를 생성하고 NO를 줄인 후, 후단에 공기를 주입하여 CO를 CO₂로 산화하고 NO의 수준을 동결시키는 법을 쓰고 있다. 다단연소에서는 CO의 생성으로 화염온도 상승을 막기 때문에 CO생성이 많아야 NO의 생성을 줄일 수 있다. 본 연구의 결과는 CO가 줄어든 후 NO가 줄어드는 경향을 나타내므로 내부적인 다단 연소도 아닌 것으로 추정된다.

3.1.4 유량변화에 따른 부분예혼합 화염의 온도장 분포

$S/D=18.4$ 이고 당량비가 60인 경우에 NO의 배출은 연료의 총유량이 1500ml/min 영역에서 최소이고 이보다 적거나 크게되면 NO의 배출이 증가하는 것을 Fig. 3에서 볼 수 있다. 연료유량변화에 따른 NO배출물의 차이를 살펴보기 위하여 온도장을 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. 연료유량이 증가할수록 고온영역이 증가함을 볼 수 있다. NO가 고온 생성물이라는 관점에서 보면 고온영역이

넓고 온도가 상대적으로 높은 3000 ml/min 인 경우가 1500ml/min 보다 높은 NO를 배출한다는 것을 설명할 수 있다. 그러나 1500 ml/min 의 경우가 1000 ml/min의 경우보다 NO가 더 낮게 배출되는 것(Fig. 3참조)은 이러한 온도의 영향만으로는 설명이 불가능하게 된다. 이는 내부의 유동과 공기의 혼합 및 화학반응 과정에서 생성된 라디칼등의 분포로부터 NO의 생성과 소멸의 메카니즘을 규명하여야 할 부분으로 사료된다.

3.2 PIV(particle image velocimetry)를 이용한 내부재순환 영역의 속도장 계측

비에혼합 화염의 화염안정화가 기연가스의 내부재순환에 의한 것임을 참고문헌 7, 8의 연구에서 밝혔으므로, 본 연구에서는 기연가스의 재순환에 노즐출구유속이 미치는 영향을 살펴보기 위하여 PIV기법을 적용하여 속도장 계측을 수행하였다.

본 연구에서 사용한 노즐은 직경 0.31mm 로서, 내부로 PIV 계측을 위한 입자를 삽입할 경우 막히는 치명적인 문제가 있으므로, 부유입자는 노즐 외부에서 삽입하는 방법을 채택하였다. 화염의 상류에서 입자를 투입하는 경우 재순환영역으로 삽입되는 입자의 수가 적어 PIV의 신호 처리에 문제가 발생한다. 이를 극복하기 위하여 많은 양의 입자를 투입하는 경우에는 화염의 형상이 왜곡되었다.

Fig. 7은 PIV 계측을 위한 입자를 측면에서 삽입하는 경우에 입자의 분포를 보여준다. 화염에 의하여 적열된 입자는 붉게 나타난다. 입자를 공급하는 관 출구에서의 속도는 1.8m/s 이다. 입자를 공급하는 위치에 따라 입자가 화염면 후류로 이동하거나, 화염면 상류와 하류로 이동하는 것을 볼 수 있다. 즉, 적열하는 입자의 궤적으로 기연가스가 상류로 이동하는 내부재순환이 있음을 확인할 수 있다. 화염의 하류에서 상류로 입자를 공급하는 경우에도 입자의 이동은 유사한 경향을 나타내었다.

Fig. 8은 S/D=18.4인 비에혼합 프로판 화염 밀면에서 재순환되는 영역의 평균속력을 나타낸다. 재순환영역에서 입자의 밀도가 적은 관계로 인하여, 한 지점에서의 속도가 아닌 노즐 밀면으로부터

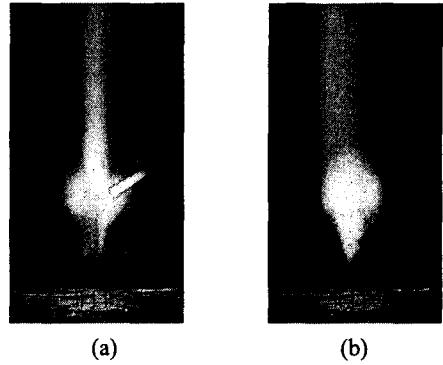


Fig. 7 Effect of particle feeding positions on the particle trajectory

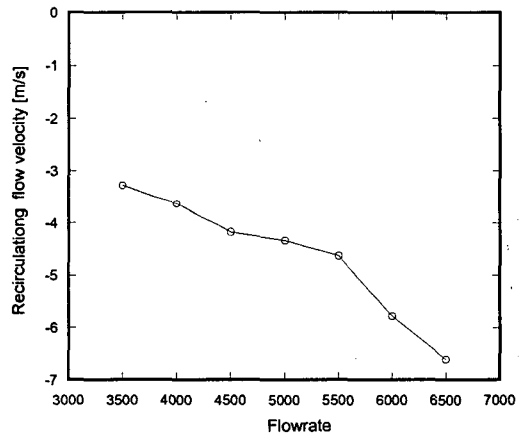


Fig. 8 Effect of flowrate on the recirculating flow velocity for non-premixed and S/D=18.3 case

18~20mm, 폭 4mm인 직사각형 영역의 평균속도를 구하였다. 음의 값은 상류방향으로의 속도임을 나타낸다. 연료의 유속이 증가할수록 내부 재순환 속도도 커짐을 볼 수 있다. 이는 연료의 분출속도가 커짐에 따라 노즐배열 내부에 형성되는 음압이 커지는 것에 기인하는 것으로 사료된다.

4. 결론

원형배열로 구성된 프로판 상호작용 화염의 주요 화학종, 온도장 및 속도 측정을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 다수 비예혼합 상호작용 화염에 비하여 부분예혼합의 경우에 NO 배출량은 최대 83% 저감되었다.

(2) 부분예혼합 상호작용 화염에서는 CO가 감소한 후에 NO가 감소하며 산소 농도가 증가하였다.

(3) 노즐 출구속도가 증가할수록 화염 밑면의 재순환 속도는 증가하였다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, H.Y. and Chun, C.K., 1991, "The Interaction of Gaseous Diffusion Flames," *Trans. of the KSME*, Vol. 15, No. 1, pp. 355~365.
- (2) Chun, C.K., 1993, "Production of NO in Interacting Laminar Diffusion Flames," *Trans. of the KSME*, Vol. 17, No. 1, pp. 190~199.
- (3) Menon, R. and Gollahalli, S. R., 1985, "Multiple Jet Gas Flames in Still Air," *In Heat Transfer in Fire and Combustion Systems*, ASME publication HTD, Vol. 45, pp. 127~136.
- (4) Menon R. and Gollahalli S. R., 1988, "Combustion Characteristics of Interaction Multiple Jets in Cross Flow," *Combustion. Science and Technology*, Vol. 60, pp. 375~389.
- (5) Lee, S. and Lee, B.J., 2001, "Characteristics of Interacting Lifted Flames," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 25, No. 4, pp. 461~466.
- (6) Kim, J.S. and Lee, B.J., 2003, "Stability Enhancement by the Interaction of Diffusion Flames," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 27, NO. 5, pp. 1420~1426.
- (7) Lee, B.J. Kim, J.S. and Lee, S., 2004, "Enhancement of Blowout Limit by The Interaction of Multiple Nonpremixed Jet Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 176, pp. 481~497.
- (8) Lee, B.J. and Kim, J.H., 2005, "Nozzle Configurations for Partially Premixed Interacting Jet Flame to Enhance Blowout Limits," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, pp. 71~79.
- (9) Lee, B.J. and Kim, J.H., 2005, "Characteristics of Methane Non-Premixed Multiple Jet Flames," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, pp. 349~355.
- (10) Turns, S. R., 1996, *An Introduction to Combustion*, McGraw Hill, 2ed, p. 494.