

## 다수노즐에 의한 확산화염의 안정성 확대에 관한 연구

김진현\* · 이병준\*\*

### The Stability of Turbulent nonpremixed interacting Flames

Jin-Hyun Kim and Byeong-Jun Lee

#### ABSTRACT

Characteristic of turbulent nonpremixed interacting flames are investigated experimentally 8 or 9 nozzles are arranged in the shape of matrix or circle. When there is no center nozzle, flame is more stable than with center nozzle case. It is shown that these blowout limit enlargements are related with the recirculation of burnt gases.

The interacting flame base was not located at the stoichiometric point. NO concentrations of interacting flame are smaller than that of single flame using same area nozzle.

**Key Words** : Flame Stability(화염 안정성), Interaction(상호작용), Blowout(화염날림), Turbulent Lifted Flame(난류 부상화염), Nonpremixed flame(비예혼합화염)

#### 기 호 설 명

$S$  Distance of the near nozzle

$D$  Diameter of nozzle

$u_{b,0}$  Velocity of turbulent blowout

Quint  $Q_{total}/N_{nozzle}$ [ml/min]

$S/D$  Nozzle separation distance

$Q_{b,0}$  Flux of blowout

#### 1. 서 론

최근 연소기 설계에 있어서 연소기의 최적화와 소음발생을 줄이기 위한 연구가 많이 이루어지고 있다. 특히 가정용 난방기나 보일러 및 산업용 소형버너 등은 공간이용의 효율성을 높이기 위하여 크기를 소형화하는 방향으로 제품개발이 이루어지고 있으며 이를 위한 방법중의 하나는 화염의 크기를 줄여 연소기의 경량화와 소형화를 가능하게 하며 연소 소음을 줄이고자 하는 것이다. 이러한 이유로 노즐의 직경은 감소하고 노즐수는

증가하는 방법을 이용한다. 또한 다수 노즐이 사용된 화염은 단일 노즐의 특성보다 화염의 안정성과 오염물질 저감에 더욱 효과적이라는 것은 선행연구에 의해 알려져 있다.

동일하게 요구되는 발열량(또는 연료량)에 대하여, 층류 화염의 크기는 노즐 출구 유속이 아닌 유량에 비례[1]하기 때문에, 연료를 다수의 노즐에 나누어 보내게 되면 화염의 길이를 줄일 수 있다. 난류 화염의 경우, 화염길이는 유량이 아닌 노즐직경에 비례[2]하기 때문에 작은 직경의 노즐을 쓰는 것이 화염크기 축소에 효과적이다. 그러나 난류 화염날림이 일어날 때의 속도,  $u_{b,0}$ 가 제트의 직경에 비례[3]하므로, 직경이 작은 노즐은 큰 것만큼 많은 양의 연료를 연소시킬 수 없게 된다. 따라서 화염의 크기를 줄이면서 필요한 난방 부하를 맞추기 위해선 난류화염의 경우에도

\* 영남대학교 대학원 기계공학과

† 이병준, Email:bjlee@yu.ac.kr, Tel:053)810-3526

\*\* 영남대학교 기계공학부

여러 개의 노즐을 사용하는 것이 효과적이다.

동일한 양의 연료를 연소시키면서 난류 화염길이 반으로 줄이는 경우에 필요한 노즐의 개수를 계산하면 다음과 같다. 전술한 바와 같이 화염길이가 직경에 비례하므로 직경을 반으로 줄이는 것이 필요하다. 이 경우 총면적이 1/4로 줄게 되므로 4개의 노즐이 필요하게 된다. 그러나 유량은 속도와 면적의 곱이므로, 화염날림이 일어날 때의 유량,  $Q_{bo}$ 는 직경의 3승에 비례하게 된다. ( $Q_{bo} = \text{면적} \times u_{bo} \sim d^2 \times d^3$ ) 즉, 노즐 직경이 줄어들수록  $Q_{bo}$ 는 급격히 줄어들게 되므로 이를 보정하기 위하여 8개의 노즐이 요구된다. 따라서 화염길이를 반으로 하면서 동일한 양의 연료를 안정하게 연소시키기 위해서는, 직경이 반인 8개의 노즐이 필요하게 된다.

이와 같이 화염의 길이축소를 위해서 노즐직경을 줄이는 경우에 다수의 노즐이 필요하게 되므로, 연소실내에서 화염들은 서로 영향을 주고받는 화염상호작용[4-8]을 초래하게 되어 단일 화염과는 다른 특성을 나타내게 된다.

화염의 상호작용은 노즐 형상, 노즐 직경, 노즐간의 거리, 연료 유속 등에 따라 열 및 물질전달, 운동량전달에 영향을 주어 화염의 기울어짐, 화염의 합류 및 화염의 길이 변화 등의 가시적인 영향뿐만 아니라,  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $O_2$  농도분포, 온도분포 등에 영향을 미치게 된다. 또한, 화염의 상호작용은 단일 화염에서보다 화염이 꺼지는 유량을 증가시켜 화염을 안정화시키는 효과가 있다 [6-8].

이 등[8]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.

본 연구는 이러한 이 등의 연구의 연속으로 센터노즐이 없는 8개 노즐과 센터노즐이 있는 9개 노즐을 사용한 경우에 대한 화염날림 특성과 화염 안정성을 고찰하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 1 에서 보여주고 있다. 연료는 1차적으로 질량유량계(mass flow controller; MKS)에 의해 유량이 조절되고, 그 조절된 유량은 외경 25.4mm 길이 50cm의 스테인레스 유량분배용 챔버를 따라 분사되게 되어 있다. 챔버는 각각의 노즐로 연료를 균일하게 공급하기 위한 부분으로 원주방향의 표면에 등원주각으로 내경 0.31mm

(외경 0.55mm)의 스테인리스 노즐들이 부착되어 있어 guide plate에서 자유로이 노즐배열을 형성시킬 수 있다. guide plate는 길이와 폭을 150×150mm으로 하였고, 두께는 6mm의 백철로 이루어져 있다. 이 plate 위에 노즐이 고정될 수 있도록 노즐배열형상에 따라 구멍을 뚫어 노즐을 배치시켰다.

노즐의 배열형상(nozzle arrangement)은 Fig. 2 에서 나타내고 있다. matrix 8, matrix 9, circle 8, 9 nozzles 로써, 크게 두 가지로 분류하면 다수노즐의 배열에 있어서 센터노즐이 있는 경우와 없는 경우로 나눌 수 있는데 matrix 9, circle 9 nozzles은 센터노즐이 있는 경우이고, matrix 8 그리고 circle 8 nozzles은 센터노즐이 없는 경우이다. 즉, 본 연구에서는 다수노즐을 배열시킬 경우 화염의 안정화를 위해 센터노즐의 역할이 어떻게 수행되는지를 중점으로 실험을 수행하였다.

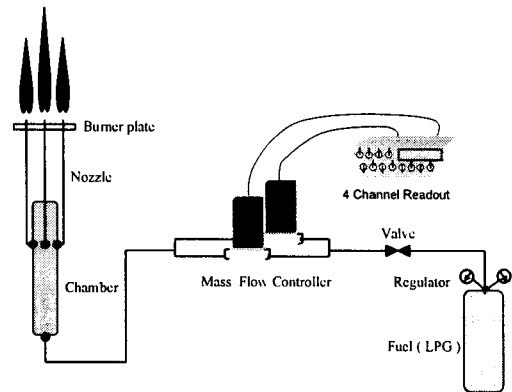


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

노즐간 최단거리, 즉 노즐의 중심과 가장 인접한 노즐의 중심까지의 거리를  $S$ 로 규정하고, 이를 노즐내경( $D=0.31\text{mm}$ )으로 나눈 무차원화된 거리를 노즐거리(nozzle separation distance)  $S/D$ 로 정의하였다. 화염길이는 노즐팁에서 화염의 선단부까지의 길이로 하였고, 부상높이(liftoff height)는 노즐팁에서 화염밀면의 가장 낮은 부분까지의 높이로 하였으며, 그 길이는 카세트메타를 통하여 측정하였다. 생성되는  $NO_x$ 를 측정하기 위하여  $NO_x$  analyzer(NOVA co.) 사용하였다.

연료의 물분율을 측정하기 위하여 아세톤 레이저 유도형광법(Laser induced fluorescence, LIF)을 사용하였다. 연료의 물분율측정을 위해 아세톤 LIF법을 사용하였다. 여기를 위하여 Nd:YAG

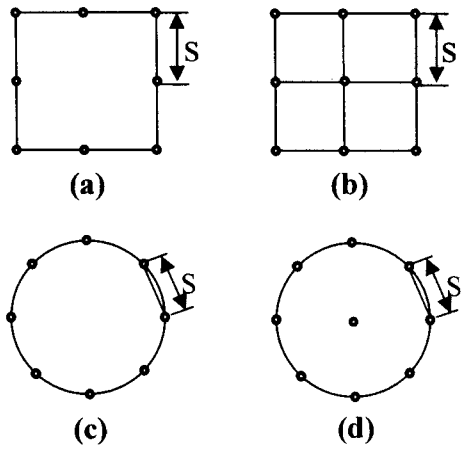


Fig. 2 Nozzle arrangements.  
 (a) Matrix 8 (b) Matrix 9  
 (c) Circle 8 (d) Circle 9

레이저의 4차 고조파인 266nm의 광을 사용하였으며, 형광신호 중에서 305nm이상의 파장대만을 흡수하도록 수광부(ICCD 카메라)에는 WG305 필터를 사용하였다.

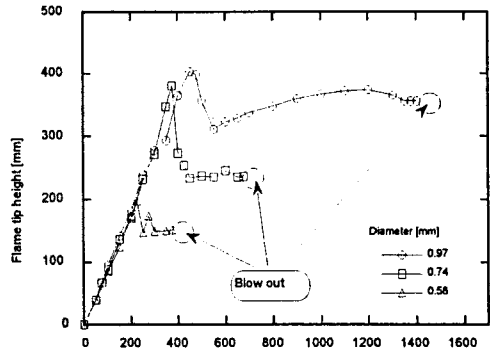
### 3. 실험결과

본 연구에서 특별한 언급이 없는 경우 유량 값은 공급되는 전체유량을 노즐의 수로 나눈 값으로, 직경 0.31mm인 단일 노즐로 유입되는 유량을 나타낸다.

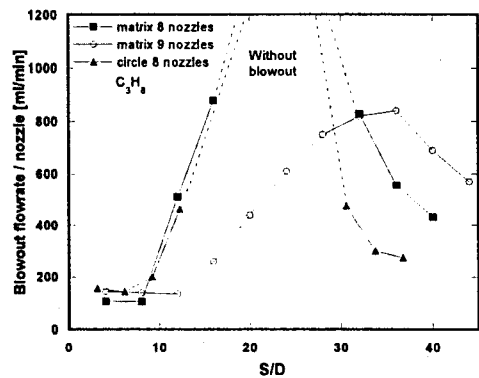
#### 3.1 화염날림 특성

Fig. 3(a)는 프로판을 사용하였을 경우 다수노즐과 비교하기 위해서 동일한 출구 단면적을 갖는 단일노즐의 직경에 관한 화염날림 특성의 결과이다. Fig. 3(b)는 프로판을 사용하였을 때, matrix 형태의 8개 노즐을 사용한 경우와 그 형태에서 센터노즐이 있는 9개의 노즐을 사용한 경우, 그리고 원형으로 8개의 노즐을 배열한 경우의 화염날림유량을 나타내고, (c)는 메탄에 대한 원형 8개 노즐의 화염날림 특성을 나타낸다. 여기서 점선은 단일 노즐당 1200ml/min에서도 화염날림이 일어나지 않음을 나타낸다. 센터노즐이 없는 경우가 있는 경우보다 더 안정함을 볼 수 있다. 센터노즐이 없는 matrix 형태의 경우에는 S/D=20~28, 원형인 경우에는 S/D=15.3~27.6 구간에 목마힘현상(choking)이 일어나도 화염날

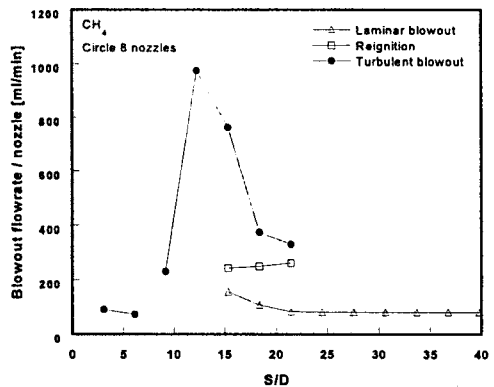
림이 일어나지 않았다. 즉, 이 영역에서는 화염이 매우 안정적임을 알 수 있다. Fig 3(a)에서 8개의 노즐과 총 면적이 유사한 직경 0.97mm의



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Blowout characteristic for  
 (a)single nozzle ,  
 (b)interacting propane flame,  
 (c)interacting methane flame.

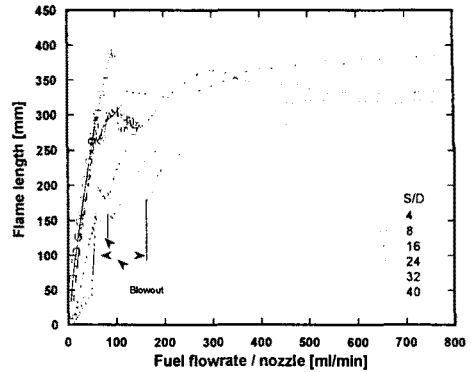
단일 노즐에서는 180ml/min의 유량에서 화염날림이 발생하므로, 중심에 노즐이 없는 matrix형 혹은 원형 8개 노즐은 동일 면적의 노즐에 비하여 5.4배 이상의 연료를 화염날림이 일어나지 않고 연소시킬 수 있음을 알 수 있다. 매탄의 경우도 화염날림이 발생하는 유량이 S/D에 영향을 받을 수 있다. 대체적인 경향은 프로판의 경우와 유사하나 S/D의 변화에 의하여 안정화되는 영역이 S/D=12~15로 좁아짐을 볼 수 있다. 이는 동일한 양일 경우 프로판보다 매탄인 경우가 완전 연소되는데 필요한 공기의 양이 적게 요구되어지는 것과 화염전파속도가 작은 것에 기인하는 것으로 사료된다.

3.2 화염길이와 화염특성

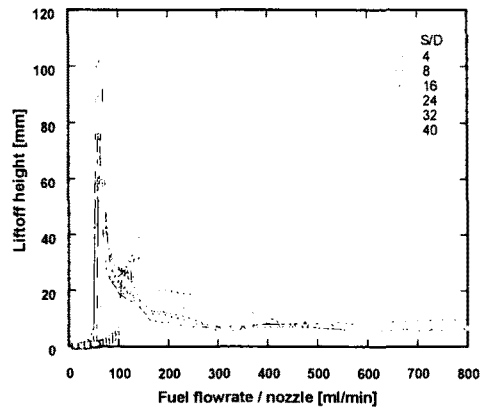
Fig. 4는 8개의 노즐로 matrix형태의 배열을 한 경우에 화염길이와 부상높이를 보여주고 있다. 화염의 길이는 부착화염영역에서 노즐거리가 작은 경우(S/D=4, 8)에는 화염이 근접하여 하나의 화염을 형성하여 전체유량이 단일 노즐에서 분사되는 것과 유사하게 나타났고, 노즐거리가 커질수록 각각의 노즐에서의 화염이 개별적으로 거동하려는 성향이 커지므로 직경 0.31mm의 단일노즐과 유사한 특성을 나타내려는 경향임을 볼 수 있다. 유량증가에 따라 천이영역을 지나 난류화염이 되는 경우, 화염길이는 S/D증가에 따라 감소하나 주어진 S/D에서는 일정함을 볼 수 있다. 이는 유량증가에 따라 화염이 부상하고 근접하여 단일 화염의 특성을 나타내기 때문인 것으로 사료된다. 단일노즐의 경우 난류부상높이는 유량에 비례하여 증가<sup>1)</sup>하나(Fig. 3 참조), 다수 화염의 난류부상높이는 유량에 무관하게 일정함을 볼 수 있다.

화염날림이 발생하지 않는 안정한 화염의 안정화 특성을 살펴보기 위하여 화염의 형상변화를 살펴보았다. Fig. 5는 노즐배열이 원형 8개 노즐로 S/D=21.4 일 때 연료 유량을 변화시키면서 촬영한 화염의 형태이다. 천이영역에서 화염의 부상높이는 줄어들고, 난류영역에서 부상높이는 유량과 무관하게 일정해짐을 볼 수 있다. 난류영역에서 화염의 기저면은 일정하지만, 주된 연소가 일어나는 영역은 하류로 이동함을 볼 수 있다. 화염은 크게 화염본체(flame body)와 그 하부에 나타나는 화염줄기(flame stem)로 나누어진다. 상호작용화염은 공급산소 결핍으로 증가하는 것으로 알려져 있으나 본 연구의 난류화염의 경우 매연이 줄어드는 것을 볼 수 있다.

노즐간격이 증가하면 화염줄기부분이 짧아지고,

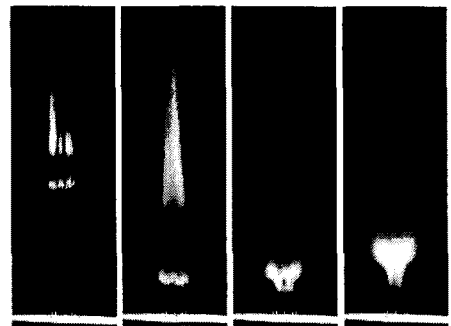


(a)



(b)

Fig. 4 Flame length and liftoff heights for matrix 8 configuration. (a) Flame length, (b) Liftoff height

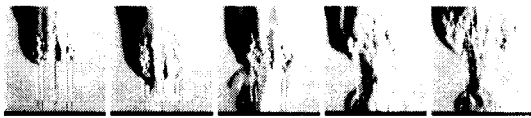


(a) (b) (c) (d)

Fig. 5 Lifted flame shapes for circular 8 nozzles when S/D=21.43 and (a) Q=80 ml/min (b) 150 (c) 300 (d) 600

S/D=27.6 이상이 되면 화염줄기와 화염본체의 구분이 모호해지면서 화염날림유량은 급격히 줄어들게 된다. 이는 S/D증가에 따라 노즐사이에 외부산화제가 유입될 수 있는 공간은 충분히 형성되지만 각각의 노즐에서 형성된 화염들이 개별적으로 거동하려는 경향이 커진 것에 기인하는 것으로 사료된다. 반면에 S/D가 12.3 보다 작게 되면 공기가 센터로 유입될 수 있는 공간이 형성되지 않아 이 화염줄기의 형상은 나타나지 않고, 저 유량에서 화염날림이 일어나게 된다.

circle 8 nozzle



circle 9 nozzle



(a) (b) (c) (d) (e)

Fig. 6 Visualization of flow fields for circle 8 and circle 9 cases when S/D=21.4 and (a)Q=100ml/min (b) 200 (c) 300 (d) 400 (e) 500

Fig. 6 은 중앙부에 노즐이 있는 경우에 비하여 노즐이 없는 경우가 화염이 더 안정한 원인을 규명하기 위한 가시화 결과를 나타낸다. 농도의 일차구배에 비례하는 영상을 만들어 내는 שלי렌법을 사용하였다. 저유량에서는 중앙부의 노즐이 있는 경우나 없는 경우나 동일하나, 고유량이 되면서 중앙부 노즐이 없는 경우에는 기연가스가 상류로 재순환하는 것을 볼 수 있다. 화염줄기면의 내부에는 외부 연료의 빠른 유속에 의한 운동량(momentum) 전달로 인해 국부적으로 참고 문헌[11]과 유사한 음압(sub-atmospheric condition)이 형성되어 강한 흡입(suction) 효과가 일어나 외부공기의 유입으로 제한되므로 기연가스가 재순환되는 것으로 사료된다. 재순환 기연가스는 상류로 열과 일부의 반응물을 공급하여 특성 화학시간을 감소시켜 화염을 더 낮은 혼합시간(더 높은 유량)까지 유지시키게 된다. 이러한 기연가스의 재순환에 기인한 화염 안정화가 일반적인 단일 난류화염의 안정화 메카니즘과 상이한 화염 안정화 메카니즘인 것으로 사료된다. 중앙부 노즐이 있는 경우는 이러한 재순환이 중앙부 노즐에 의하여 방해받아 화염날림유량이 중앙부 노즐이 없는 경우 보다 줄어드는 것으로 사료

된다.

### 3.3 NO 생성 및 광학측정 결과

Fig. 7 은 중앙부에 노즐이 없는 원형 8개 노즐을 사용한 경우에 화염 기저부의 폭 변화를 나타낸다. 유량증가에 따라 화염 기저부의 폭이 감소하는 것을 볼 수 있다.

아세톤 LIF 를 사용하여 화염 밑면에서 연료의 체적분율을 측정하여 Fig. 8 에 나타내었다. 본 LIF실험의 오차는 체적분율로 0.005 이다. 유량의 변화에 무관한 농도 분포임을 볼 수 있다. 화염의 상호작용으로 배열 중앙부로 공기의 공급이

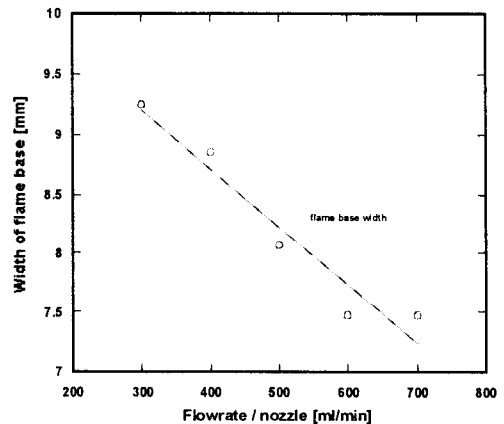


Fig. 7 Flame base width at S/D=15.3 for circle 8

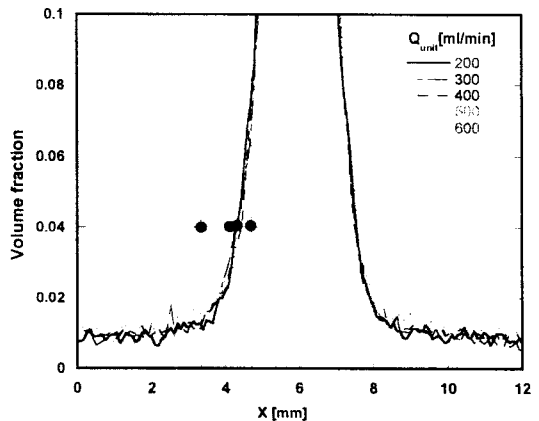


Fig. 8 Volume fraction distribution at S/D=15.3 for circle 8 . (X=0 ; center of the burner geometry, dot: position of flame bases)

제한되어 노즐 배열의 중앙부쪽의 연료 체적 분율이 바깥 부분에 비하여 완만한 비대칭으로 나타남을 볼 수 있다. 단위노즐유량이 200~600 ml/min인 경우의 화염위치인 수직선영역 ( $X=3.8\sim 4.6$  mm) 이, 연료체적 분율  $0.2\sim 0.6$  (당량비  $0.5\sim 1.5$ )에 놓여있음을 볼 수 있다. 급격한 연료 농도의 반경방향 구배, 난류화염의 두께, 난류에 의한 섭동 및 실험오차 등을 고려하더라도, 이론당량비 1인 영역을 따라 화염이 위치한다는 예혼합적 성질에 의한 단일난류화염의 anchoring 메커니즘의 설명[10]과는 차이가 남을 알 수 있다.

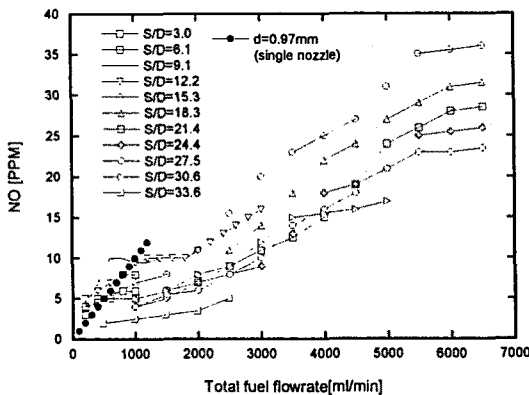


Fig. 9 NO concentration for Circle 8

Circle 8 nozzle 에서의 NO 생성량을 S/D의 변화와 전체유량의 변화에 따라 측정하였으며 상호작용 노즐과 유사면적을 가진 단일 노즐과의 경우와 비교하여 Fig. 9 에 나타내었다. 단일화염의 NOx 생성량은 유량증가에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 난류영역에서 유량증가에 따라 화염의 길이 증가는 미비하므로, 체류시간이 감소하게 되어 NOx가 감소할 수 있으나 복사손실이 일어날 시간도 줄어들어 화염의 온도가 증가하여 NOx의 생성이 증가하게 된다.[2]

상호작용화염의 NOx 생성은 유량증가에 따라 서서히 증가하다가 노즐이 choking 되는 유량 근처에서 완만해지는 S형 곡선을 나타냄을 볼 수 있다. 기울기로 볼 때 단일 노즐에 비하여 상호작용화염의 NO 생성이 적음을 볼 수 있다. 이는 상호작용으로 화염에 공급되는 공기량 결핍으로 생성된 CO가 산화되는 과정에서 O원자를 소비하게 되어 NO의 형성을 방해하는 것에 기인한다[6].

## 4. 결론

다수노즐의 상호작용하는 화염에서, 노즐의 배열형태에 따른 화염의 안정화 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 중앙부 노즐이 없는 8개의 노즐을 원형 혹은 matrix형으로 배열한 경우, 노즐거리(S/D)가 15.3~27.6사이에서는 목막힘이 일어날 때까지도 화염날림이 일어나지 않았다.

(2) 다수 노즐에 의하여 형성된 부상화염의 기저부는 이론 당량비의 영역이 아니다.

(3) 다수 화염의 안정화는 기연 가스의 재순환이 지배적인 역할을 함을 확인하였다.

(4) 다수 노즐의 경우 단일노즐보다 NO 생성율이 줄어드는 것을 볼 수 있다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- [1] Roper, F. G., 1977, "The Prediction of Laminar Jet Diffusion Flame Size: Part I. Theoretical Model," *Combust. Flame*, v. 29, pp. 219~226.
- [2] Turns, S. R. An introduction to combustion, McGraw Hill, 2ed, 1996.
- [3] Broadwell, J. E., Dahm, W. J., and Mungal, M. G., 1984, "Blowout of Turbulent Diffusion Flames," *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 303~310.
- [4] 김호영, 전철균, 1991, "기체확산 화염간의 상호작용," *대한기계학회논문집 제15권 제1호*, pp. 355~365.
- [5] 전철균, 1993, "상호작용하의 층류 확산 화염에서 NO의 생성," *대한기계학회논문집, 제 17권 제1호*, pp. 190~199.
- [6] 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.

[7] 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.

[8] 이승, 이병준, 2001, "상호작용하는 부상화염에 특성에 관한 연구", *대한기계학회 논문집 제25권 제4호*, pp. 461~466.

[9] Kalghatgi, G. T., 1984, "Lift-off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air," *Combust. Sci. Tech.*, 41, pp. 17~29.

[10] Vanquickenborne, L., and van Tigglen, A., 1969, "The Stabilization Mechanism of Lifted Diffusion Flames," *Combust. Flame*, v.10, pp. 59~69.

[11] A. Nasr, J. C. S. Lai, 1997, "Two Parallel Plane Jets : Mean Flow and Effects of Acoustic Excitation," *Experimental in Fluids*, v. 22, pp251~260.