

## 다수 비예혼합 화염의 안정화 특성

김진선\*·이병준†

(2003년 3월 11일 접수, 2003년 8월 9일 심사완료)

### Stability Enhancement by the Interaction of Diffusion Flames

Jin-Sun Kim and Byeong-Jun Lee

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

#### Abstract

The stability of turbulent nonpremixed interacting flames is investigated in terms of nozzle configuration shapes and kind of fuels. Four nozzle arrangements - cross 5, matrix 8, matrix 9 and circle 8 nozzles - are used in the experiment. There are many parameters affecting flame stability in multi-nozzle flames such as nozzle separation distance, fuel flowrates and nozzle configuration etc. Key factors to enhance blowout limit are the nozzle configuration and the existence of center nozzle. Even nozzle exit velocity equal 204 m/s, flame is not extinguished when there is not a center nozzle and  $s/d=15.3\sim 27.6$  in matrix-8 and circular-8 configurations. At these conditions, recirculation of burnt gas is related with stability augmentation. Fuel mole fraction measurements using laser induced fluorescence reveal lifted flame base is not located at the stoichiometric contour.

#### 1. 서론

가정용 난방기나 보일러 등은 공간이용의 효율성을 높이기 위하여 크기를 소형화하는 방향으로 제품개발이 이루어지고 있다. 이를 위한 방법중의 하나는 화염의 크기를 줄이는 것이다.

동일하게 요구되는 발열량(또는 연료량)에 대하여, 층류 화염의 크기는 노즐 출구 유속이 아닌 유량에 비례<sup>(1)</sup>하기 때문에, 연료를 다수의 노즐에 나누어 보내게 되면 화염의 길이를 줄일 수 있다. 난류 화염의 경우, 화염길이는 유량이 아닌 노즐직경에 비례<sup>(2)</sup>하기 때문에 작은 직경의 노즐

을 쓰는 것이 화염크기 축소에 효과적이다. 그러나 난류 화염날림이 일어날 때의 속도,  $u_{bo}$ 가 제트의 직경에 비례<sup>(3)</sup>하므로, 직경이 작은 노즐은 큰 것만큼 많은 양의 연료를 연소시킬 수 없게 된다. 따라서 화염의 크기를 줄이면서 필요한 난방 부하를 맞추기 위해선 난류화염의 경우에도 여러 개의 노즐을 사용하는 것이 효과적이다.

동일한 양의 연료를 연소시키면서 난류 화염길이를 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,  $Q_{bo}$ 은 직경의 3승에 비례하게 된다. ( $Q_{bo} = \text{면적} \cdot u_{bo} \sim d^2 \cdot d = d^3$ ) 즉, 노즐 직경이 줄어들수록  $Q_{bo}$ 는 급격히 줄어들게 되므로 이를 보정하기 위하여 8개의 노즐이 요구된다. 따라서 화염길이를 반으로 하면서 동일한 양의 연료를

† 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : bjlee@yu.ac.kr

TEL : (053)810-3526 FAX : (053)813-3703

\* 영남대학교 대학원 기계공학부

안정하게 연소시키기 위해서는, 직경이 반인 8개의 노즐이 필요하다.

이와 같이 화염의 길이축소를 위해서 노즐직경을 줄이는 경우에 다수의 노즐이 필요하게 되므로, 연소실내에서 화염들은 서로 영향을 주고받는 화염상호작용<sup>(4-9)</sup>을 초래하게되어 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 화염의 길이 변화 등의 가시적인 영향뿐만 아니라, NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>2</sub> 농도분포, 온도분포 등에 영향을 미치게 된다. 또한, 화염의 상호작용은 단일 화염에서보다 화염이 꺼지는 유량이 증가시켜 화염을 안정화시키는 효과가 있다.<sup>(6-8)</sup>

이 등<sup>(8)</sup>은 동일 직경의 노즐 5개를 선형으로, 5개를 diamond 형으로, 4개를 cross 형으로 배열한 경우에 대하여 연구를 수행하였다. Q<sub>bo</sub>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 노즐을 최대 9개까지 사용한 경우에 대한 화염날림 특성과 화염 안정성을 고찰하고자한다.

2. 실험장치 및 방법

노즐의 배열에 따른 난류부상화염(turbulent lifted flame)의 특성을 파악하기 위해 십자형태의 5개 노즐, matrix 형태의 9개 노즐, 센터노즐이 없는 8개의 노즐을 이용한 형태인 사각형과 원형의 배열형태와 비교하면서 실험을 수행하였다 [Fig. 1 참조]. 연료는 LPG와 메탄을 사용하였다. 연료는 유량계에 의해 전체유량이 조절된 후 외경 25.4mm, 길이 50cm의 스테인레스 유량분배용 관으로 공급된다. 유량분배용 관의 표면을 따라 등원주각으로 부착된 내경(D) 0.31mm 노즐을 통하여 연료는 각각의 노즐로 분사된다. 각 노즐은 노즐 가이드용 판에 의하여 노즐간격, 노즐배열 및 수직이 유지되며, 노즐은 이 판으로부터 6.4mm 돌출되어 있다.

노즐의 중심과 가장 인접한 노즐의 중심까지 거리를 노즐거리(nozzle separation distance), S로

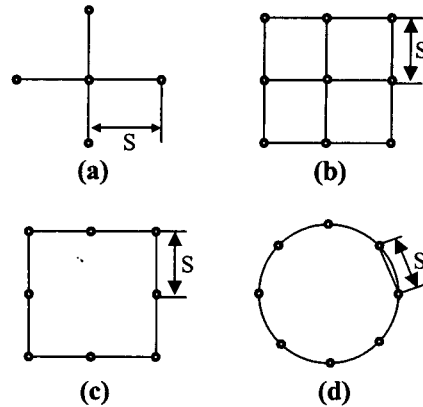


Fig. 1 Nozzle arrangement ; (a) cross 5, (b) matrix 9, (c) matrix 8, (d) circle 8 nozzles

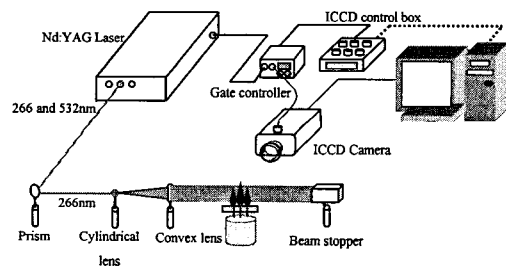


Fig. 2 Experimental apparatus for acetone LIF

정의하였다. 실험변수로서 노즐간 거리를 노즐직경으로 무차원화시킨 S/D와 노즐당 유량(Q<sub>unit</sub>)을 각각의 노즐배열형태에 대하여 변화시키면서 실험을 수행하였다.

화염에서 생성된 OH 라디칼의 분포를 가시화하거나, 연료의 물분율을 측정하기 위하여 레이저 유도형광법(Laser induced fluorescence, LIF)을 사용하였다. Figure 2는 이러한 LIF법의 장치도를 나타낸다.

연료의 물분율측정을 위해 아세톤 LIF법을 사용하였다. 아세톤 LIF법은 연료와 함께 분사한 기상의 아세톤을 여기시켰을 때 나오는 형광신호로부터 연료의 물분율을 추정하는 방법이다. 여기를 위하여 Nd:YAG 레이저의 4차고조파인 266nm의 광을 사용하였으며, 형광신호 중에서 305nm이상의 파장대만을 흡수하도록 수광부(ICCD 카메라)에는 WG305 필터를 사용하였다.

OH LIF인 경우에는  $X_2I$ 의  $Q_1(8)$  라인 (283.64nm)으로 여기시켜 내는 형광신호를 UG11과 WG305 필터를 사용하여 수광하였다.

ICCD 카메라의 셔터개방시간은 200ns이며 레이저 출력은 17mJ/pulse 이다.

### 3. 실험결과

본 실험에서 모든 유량값은 공급되는 전체유량을 노즐의 수로 나눈값으로, 직경 0.31mm인 단일 노즐로 유입되는 유량을 나타낸다.

#### 3.1 화염날림 특성

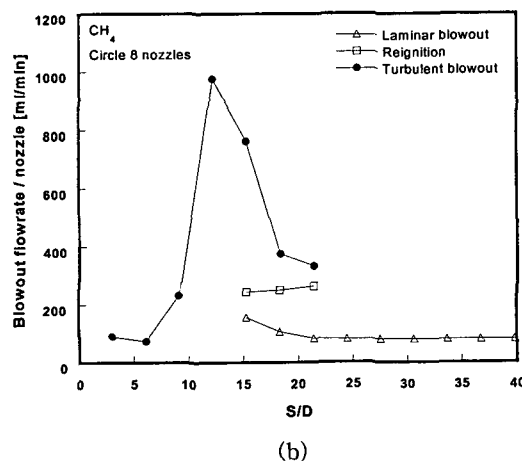
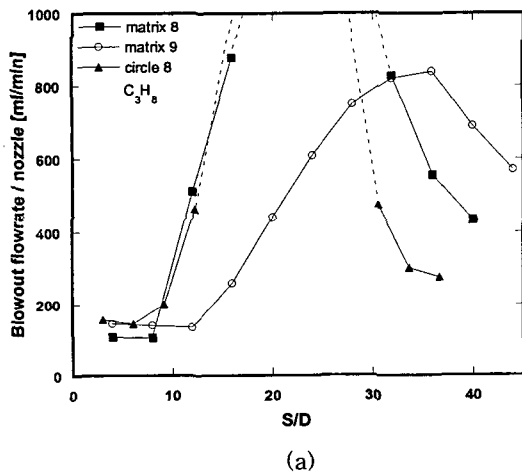
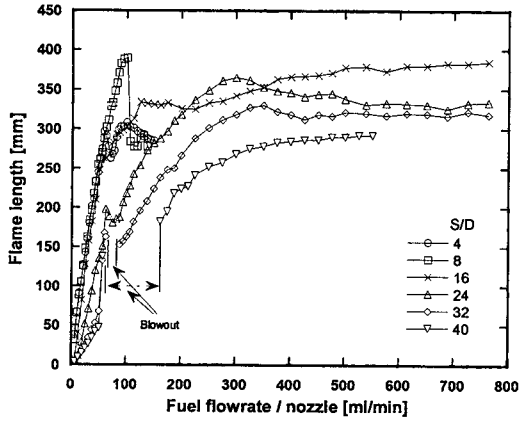


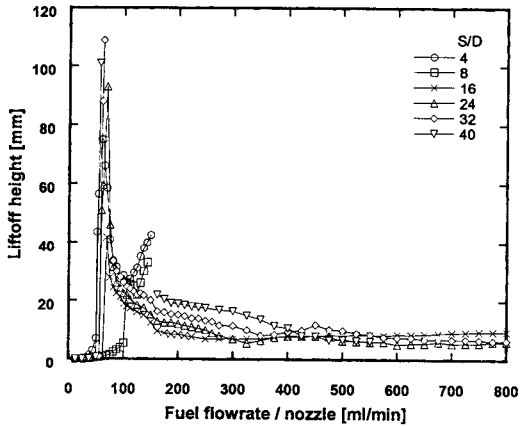
Fig. 3 Blowout flowrates as functions of S/D and fuel types for (a) propane (b) methane

Figure 3은 각각의 노즐배열에 있어서 노즐거리에 대하여 표준상태에서의 화염날림유량을 나타낸다. (a)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, (b)는 메탄에 대한 원형 8개 노즐의 화염날림 특성을 나타낸다. 여기서 점선은 단일 노즐당 920ml/min(204m/s)에서도 화염날림이 일어나지 않음을 나타낸다. Circle 8이나 matrix 8인 경우에는 화염날림이 일어나지 않는 구간이 존재하나 matrix 9 경우에는 이러한 구간이 존재하지 않으므로, 센터노즐이 없는 경우가 있는 경우보다 더 안정함을 볼 수 있다(안정화 메커니즘에 관해서는 3.2 절에서 논의). 센터노즐이 없는 matrix 형태의 경우에는 S/D=20~28, 원형인 경우에는 S/D=15.3~27.6 구간에서 목막힘현상(choking)이 일어나도 화염날림이 일어나지 않았다. 즉, 이 영역에서는 화염이 매우 안정적임을 알 수 있다. 8개의 노즐과 총 면적이 유사한 직경 0.97mm의 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. 메탄의 경우도 화염날림이 발생하는 유량이 S/D에 영향을 받음을 볼 수 있다. 대체적인 경향은 프로판의 경우와 유사하나 S/D의 변화에 의하여 더욱 안정화되는 영역이 S/D=12~15로 좁아짐을 볼 수 있다. 이는 동일한 양일 경우 프로판보다 메탄인 경우가 완전 연소되는데 필요한 공기의 양이 적게 요구되어지는 것에 기인하는 것으로 사료된다.

Figure 4는 8개 노즐로 matrix형 배열을 한 경우의 화염길이와 부상높이를 나타낸다. 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 각각 노즐에서의 화염이 개별적으로 거동하려는 성향이 커지므로 직경 0.31mm의 단일노즐과 유사한 특성을 나타내려는 경향임을 볼 수 있다. 유량증가에 따라 천이영역을 지나 난류화염이



(a)

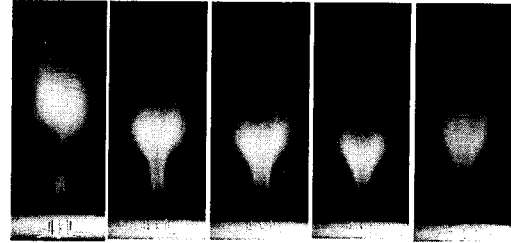


(b)

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

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>(9)</sup>하나, 다수 화염의 난류부상높이는 유량에 무관하게 일정함을 볼 수 있다.

화염날림이 발생하지 않는 안정한 화염의 안정화 특성을 살펴보기 위하여 화염의 형상변화를 살펴보았다. Figure 5는 노즐배열이 원형 8개 노즐로 노즐 당 연료유량이 700 ml/min인 경우의 노즐간격의 변화에 따른 화염형상을 나타낸다. 8개 노즐을 사용하여 matrix 형태로 배열한 경우



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

Fig. 5 Turbulent flame shapes as a function of nozzle separation distance for circle 8 nozzle at  $Q_{unit}=700$  ml/min and (a)S/D=15.3, (b) 18.4, (c) 21.4, (d) 24.5, (e) 27.6

도 유사한 화염형태를 나타낸다. 화염은 크게 화염본체(flame body)와 그 하부에 나타나는 화염줄기(flame stem)로 나누어진다. 노즐간격이 증가하면 화염줄기부분이 짧아지고, 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.

3.2 광학측정 결과

Figure 6은 십자형태 5개 노즐의 경우에 대한 OH 농도분포를 나타낸다. (a)~(c)는 연료유량을 150 [ml/min]으로 고정시키고, 노즐간격을 증가시킬 때의 경우이고, (d)는 S/D=28이고  $Q_{unit}=250$ ml/min인 경우의 OH 라디컬의 분포와 실제화염의 형상을 투영시킨 사진이다. S/D=28인 영역은 십자형태 5개 노즐에서 화염이 가장 안정한 노즐간격이다. 노즐거리(S/D)가 증가할수록 노즐사이에서 OH 라디컬의 농도가 큰 반응영역이 나타나는 것을 볼 수 있었으며, 노즐거리가 증가할수록 화염가장자리에 비해 이 영역의 OH 라디컬의 농도가 커짐을 볼 수 있다. 이는 노즐간격이 커질수록 공기가 유입될 수 있는 공간이

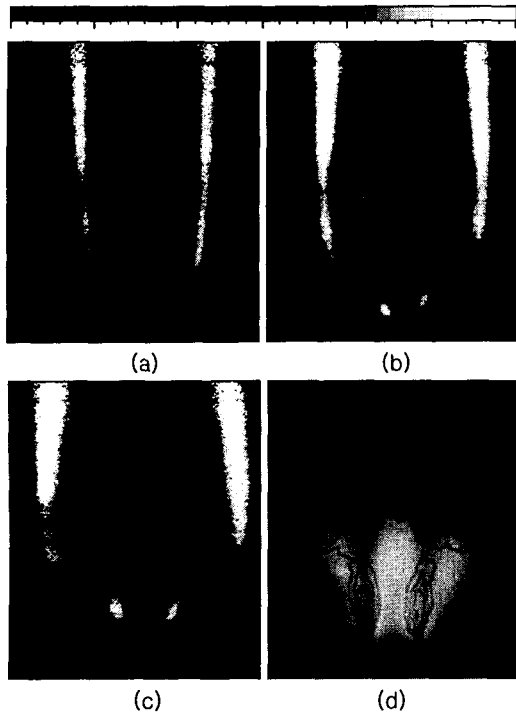


Fig. 6 OH profiles for cross-5 nozzle as function of S/D and flowrate; (a) S/D=14,  $Q_{min}$ =150ml/min, (b) S/D=20, 150ml/min, (c) S/D=28, 150ml/min. (d) flame shape and OH radical contours for S/D=28, 250ml/min.

증가하게 되어 내부 영역에서 연소반응이 활발해지기 때문에 일어나는 현상으로 사료된다. 노즐 간격이 커지면서 전체적으로 화염날림유량이 증가하는데 이는 노즐과 노즐사이의 영역에서 성장하는 반응영역의 증가에 의한 것으로 사료된다. 이와 아울러 S/D가 커짐에 따라 중앙부에서 화염을 잡아주던(anchoring) 부분의 반응이 유동을 가로질러 외부의 화염과 연합됨을 볼 수 있다. 이러한 S/D 증가에 따른 반응 영역의 증가가 유량이 동일할 때 화염길이의 감소를 초래한 것(Fig. 4참조)으로 사료된다.

Figure 7은 원형 8개 노즐이고, S/D=15.3 인 경우에 대하여 유량 변화에 따른 화염 기저면 폭의 변화를 나타낸다. 얇은 청색을 띠고있는 화염 기저면의 폭은 유량 증가와 무관하게 일정함을 볼 수 있다. Fig. 7의 측정조건에서 부상 높이는 Fig. 4와 유사하게 8.5mm로 일정하였다.

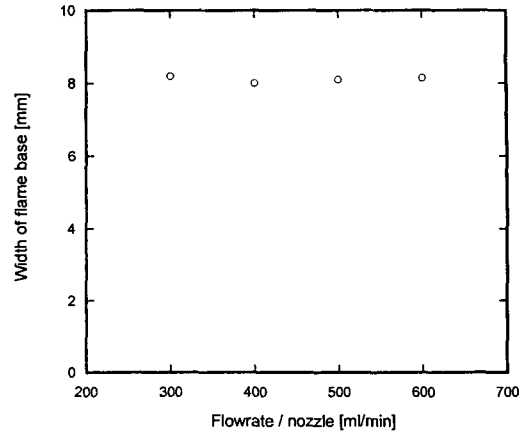


Fig. 7 Flame base width at S/D=15.3 for circle 8 nozzles

이 높이에서 아세톤 LIF 를 사용하여 화염 밑면에서 연료의 체적분율을 측정하여 당량비로 환산한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 수직선은 화염 밑면의 반치폭(half width), 즉 화염 부착점의 위치를 나타낸다.

난류 확산계수와 난류 점성계수가 동일하다고 가정하면 분출되는 연료의 질량분율 분포는, 난류제트의 축방향속도를 노즐 출구에서의 속도로 무차원한 값( $u/u_0$ )과 동일한 상사해이고 출구유속과 무관한 분포를 가지게 된다.<sup>(2)</sup> 따라서 임의의 축방향 위치에서 연료의 질량분율(혹은 체적분율)의 분포가 노즐 출구 유량과 무관할 것을 예측할 수 있다. Fig. 8은 이러한 관계(연료의 체적분율이 노즐 출구 유량과 무관)를 보여준다.

화염 부착점에서 측정된 당량비는 측정점의 정확도, 난류화염의 섭동 및 실험오차 등에 따라 영향을 받게되겠지만, 단위노즐 유량이 200~600ml/min인 경우의 화염은 당량비 0.55 부근에 놓여있음을 볼 수 있다. 이는 화염전파속도가 최대로 되는 농도의 궤적을 따라 화염이 위치한다는 예혼합적 성질에 의한 단일 난류 화염의 anchoring메커니즘의 설명<sup>(10)</sup>과 절대값에서는 차이가 나지만 일정한 당량비라는 면에서는 일치한다.

Figure 9는 화염이 없는 경우의 유동장, 화염 밑면 사진 및 화염이 있는 경우의 유동장을 나타낸다. 가시화는 온도나 성분변화에 따른 밀도의 일차구배에 비례하는 경계를 나타내는 쉘리렌 기

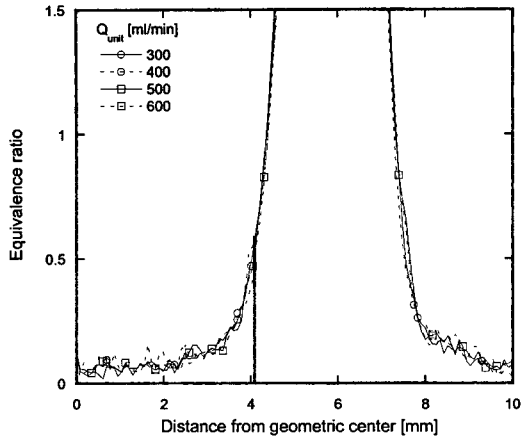


Fig. 8 Equivalence ratio distribution at S/D=15.3 for circle 8 nozzles. Vertical line represents the location of flame base.

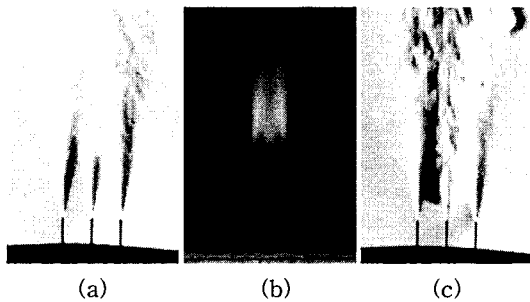


Fig. 9 Flow visualizations for matrix 8 nozzles at  $Q_{unit}=500$  ml/min, S/D=16 (a) cold flow, (b) direct photograph of the flame base (c) case with flame

법을 사용하였다. 화염이 없는 경우에 노즐에서 분사된 연료는 제트의 퍼짐에 의하여 주위 노즐에서 분사된 연료와 노즐거리의 약 두 배되는 지점(2S)에서 서로 합체됨을 볼 수 있다. 합체가 이루어지기 전에는 각 노즐에서 분사된 연료의 경계가 서로 명확함과 각 경계 사이에는 다른 밀도의 변화가 없음을 볼 수 있다. 또한 육안으로 관찰되는 화염도 2S 영역까지는 화염이 존재하지 않음을 볼 수 있다. 그러나 화염이 있는 쉘리렌 사진을 살펴보면 화염밀면과 노즐사이의 영역에 노즐에서 분사되는 연료의 명암과는 다른 명암이 나타남을 볼 수 있다. 이는 농도차이가 아닌, 화염의 기연가스가 상류로 재순환하는 것에 기인하

는 것으로 사료된다. 즉, 화염 줄기면의 내부에는 외부 연료의 빠른 유속에 의한 운동량(momentum) 전달로 인해 국부적으로 참고문헌(11)과 유사한 음압(sub-atmospheric condition)이 형성되어 강한 흡입(suction) 효과가 일어나 외부공기의 유입으로 제한되므로 기연가스가 재순환되는 것으로 사료된다. 이러한 기연가스의 재순환에 기인한 화염 안정화가 Fig. 8에서 서술한 바대로 일반적인 단일 난류화염의 안정화 메카니즘과 상이한 화염 안정화 메카니즘인 것으로 사료된다. 중앙부 노즐이 있는 경우는 이러한 재순환이 중앙부 노즐에 의하여 방해받지 않아 화염 날림유량이 중앙부 노즐이 없는 경우보다 줄어드는 것으로 사료된다.

#### 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 15.3~27.6 사이에서는 목막힘이 일어날 때까지도 화염날림이 일어나지 않았다.
- (2) 다수 노즐에 의하여 형성된 부상화염의 기저부는 이론 당량비의 영역이 아니다.

#### 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*, Vol. 29, pp. 219~226.
- (2) Turns, S. R. 1996, *An introduction to combustion*, McGraw Hill, 2ed
- (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) Kim, H.Y., Chun, C.K., 1991, "The Interaction of Gaseous Diffusion Flames," *Trans. of KSME*, Vol. 15, No. 1, pp. 355~365.
- (5) Chun, C.K., 1993, "Production of NO in Interacting Laminar Diffusion Flames," *Trans. of KSME*, Vol. 17, No. 1, 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) Lee, S., Lee, B.J., 2001, "Characteristics of Interacting Lifted Flames," *Trans. of KSME (B)*, Vol. 25, No. 4, 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*, Vol. 10, pp. 59~69.
- (11) Nasr, A. and Lai, J. C. S., 1997, Two Parallel Plane Jets : Mean Flow and Effects of Acoustic Excitation, *Experimental in Fluids*, Vol. 22, pp. 251~260.