

다수 난류 비예혼합 화염의 상호작용에 관한 연구

김진선* · 이병준**

The Stability of Turbulent Interacting Flames

Jin-Sun Kim and Byeong-Jun Lee

Key Words: Flame Stability(화염 안정성), Interaction(상호작용), Tag Flame(꼬리화염), Blowout(화염날림), Turbulent Lifted Flame(난류 부상화염), Flame Height(화염높이), Liftoff Height(부상높이)

Abstract

The stability of turbulent nonpremixed interacting flames is investigated in terms of nozzle configuration shapes which depend on the existence of the center nozzles.

Six nozzle arrangements which are cross 4, 5, 8, 9, square 8 and circular 8 nozzles are used for the experiment. Those are arranged to see the effect of the center nozzle out of multi-nozzle.

There are many parameters that affect flame stability in multi-nozzle flame such as nozzle separation distance, fuel flowrates and nozzle configuration, but the most important factor is the existence of nozzles in the center area from the nozzle arrangement. As the number of nozzle in the area is reduced, more air can be entrained into the center of flame base and then tag flame is formed. In the case of circular 8 nozzles, blowout flowrates are above 5.4 times compared with that of single equivalent area nozzle.

1. 서론

다수 노즐에 의한 화염의 상호작용(interaction)에 의한 연소는 단일노즐에 비해 화염 안정화(flame stability) 측면에서 훨씬 효과적이어서 산업 전반에 걸쳐 연소실 및 버너제작에 널리 응용되고 있다. 하지만, 이에 관련된 연구는 아직 많은 부분이 충류에 국한되어 있고 난류영역에서는 그 연구가 미흡한 실정이다. 다수 노즐이 사용된 화염은 단일 노즐의 특성보다 화염의 안정성과 오염물질 저감에 더욱 효과적이라는 것은 선행연구

에 의해 알려져 있다.

이 등¹⁾은 다수 노즐을 사용함으로 단일노즐에 비하여 화염이 더욱 안정화됨을 보였는데, 5개의 노즐을 사용한 경우, 노즐직경의 28~32배로 노즐 간격을 유지했을 때, 화염날림의 유량이 동일면적의 단일 노즐보다 3.3배 증가함을 보였다.

본 실험에서는 난류화염을 안정화시키는 노즐 배열에 있어서 효과적인 위치와 그에 따른 산화제의 유입 특성, 노즐간격(S/D)의 변화에 따른 특성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

노즐의 배열에 따른 난류부상화염(turbulent lifted flame)의 특성을 파악하기 위해 십자형태의 5, 9개 노즐과 이를 비교하기 위해서 센터노즐이 없는 4, 8개의 십자형태의 노즐배열과 증앙을 중

* 영남대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 영남대학교 기계공학과

십으로 노즐이 둘러싼 형태인 사각형과 원형의 배열형태에 대하여 실험을 수행하였다[Fig. 1 참조]. 연료는 LPG를 사용하였고, 그 연료는 유량계(MFC)에 의해 유량이 조절되어 챔버의 역할을 하는 외경 25.4mm, 길이 50cm의 스테인레스관을 지나면서 유동은 균일화된다. 그리고, 관의 표면을 따라 등원주각으로 붙어 있는 내경 0.31mm 노즐을 통하여 연료는 각각의 노즐 배열 형태에 따라 분사된다. 버너플레이트에서 노즐팁까지 길이는 6.4mm이다[Fig. 2 참조].

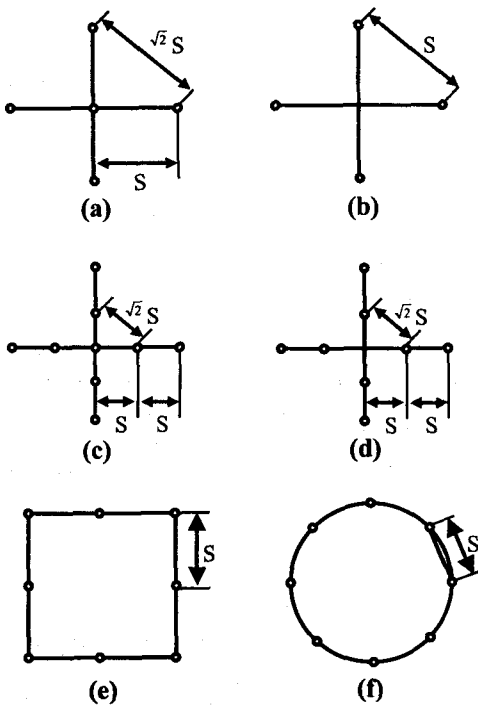


Fig. 1 Nozzle arrangements.

- (a) Cross 5 nozzles (b) Cross 4 nozzles
- (c) Cross 9 nozzles (d) Cross 8 nozzles
- (e) Square 8 nozzles (f) Circular 8 nozzles

모든 경우에 대하여 노즐의 직경 D 는 0.31mm 이고, 노즐의 중심과 가장 인접한 노즐의 중심까지 거리를 노즐거리(nozzle separation distance)를 S 로 정의하였다. 화염길이(flame height)와 화염부상높이(liftoff height)는 화염의 선단부 높이

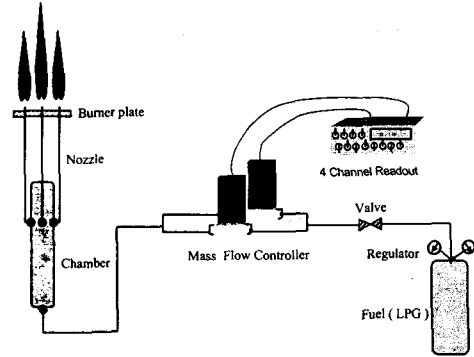


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

와 화염빛면의 높이로 정의하였고, 그 높이는 Cathetometer를 이용하여 육안으로 측정하였다. 실험변수로서 노즐간 거리를 노즐직경으로 무차원화시킨 S/D 와 유량(Q)를 각각의 노즐배열형태에 대하여 변화시키면서 실험을 수행하였다.

3. 실험결과

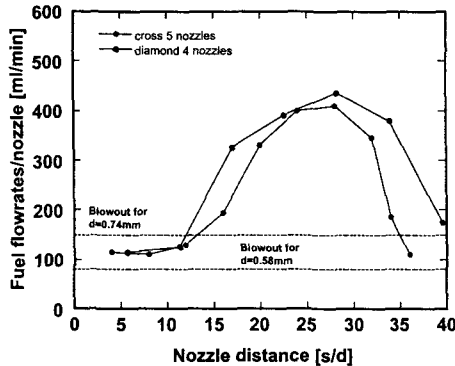
본 실험에서 모든 유량값은 챔버로 공급되는 전체유량을 다수 노즐의 수로 나눈 직경이 0.31mm 인 단일 노즐로 유입되는 유량으로 나타내었다.

3.1 센터노즐의 유무에 따른 난류 화염날림의 특성 비교

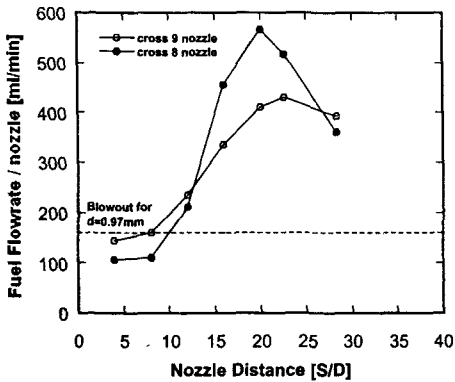
십자형태의 노즐배열에 있어서 센터노즐이 있는 경우와 없는 경우의 난류 화염날림 특성을 비교하였다. 먼저 9개의 노즐들의 면적을 합한 면적과 유사한 직경이 0.97mm인 단일노즐의 경우에 대하여 화염날림 유량을 조사하였는데, 전체유량이 1575[ml/min]으로 직경 0.31mm에 상응하는 화염날림유량은 160[ml/min]이었다.

Fig 3에서 십자형태의 4개 노즐을 사용하는 경우 센터노즐이 있는 5개의 노즐형태보다 전반적으로 화염날림유량이 증가함을 볼 수 있다⁽⁶⁾. 센터노즐이 없는 십자형으로 8개의 노즐을 배열한 경우가 동일한 배열형태로 센터노즐이 있는 십자형태로 9개의 노즐을 배열한 형태보다 최대 난류 화염날림유량(turbulent lifted blowout)이 $S/D=1.3\sim 27$ 의 영역에서 보다 높게 나타나고, 그 외의

영역에서는 센터노즐이 있는 경우가 높게 나타난다. 최대화염날림유량을 보면, 센터노즐이 있는 십자형태의 9개 노즐배열은 S/D=22.6에서 노즐당 유량이 430[ml/min]으로 단일노즐의 경우보다 2.7배로 화염날림유량이 증가하고, 센터노즐이 없는 8개의 십자형태는 S/D=20에서 노즐당 유량이 567[ml/min]으로 단일노즐의 경우보다 3.5배의 화염날림유량이 증가한다.



(a)



(b)

Fig. 3 Turbulent blowout flowrates for (a) cross 4, 5 nozzles, (b) cross 8, 9 nozzles

즉, 최대 난류 화염날림유량 근처에서는 센터노즐이 있는 경우보다 없는 경우의 다수노즐의 화염이 보다 안정적이라고 볼 수 있다. 이는 화염이 난류상태가 되면서 센터노즐이 없으면 화염의 기저부로 주위로부터 공기를 더 많이 유입될 수

있는 공간을 형성하여 난류확산화염에서 화염면의 예혼합화를 더욱 커지게 하기 때문인 것으로 사료된다.

3.2 센터노즐이 없는 노즐배열에 대한 난류화염의 특성

화염 기저부의 가운데 영역으로 좀 더 많은 주위의 공기를 유입시키기 위하여 센터부근의 노즐수를 줄인 노즐배열형태로써 8개의 노즐들을 사각형과 원형으로 배열하여 실험을 수행하였다.

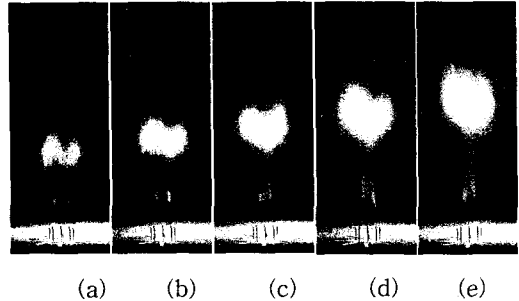


Fig. 4 Turbulent flame shapes by fuel flowrates for circular 8 nozzles at S/D=15.31 (a) Q=300[ml/min], (b) 400, (c) 500, (d) 600, (e) 700

사각형과 원형의 경우는 유사한 노즐배열형태로 그 화염의 특성이 또한 유사하게 나타난다. Fig 4는 노즐배열이 원형인 경우로 노즐간격(S/D)을 15.31로 고정시키고 노즐 당 유량을 300ml/min에서 700ml/min까지 증가시켰을 때에 화염형상의 변화를 보여주는 사진이다. 사진에서 화염은 크게 화염본체와 화염꼬리의 2부분으로 나눌 수 있다. 유량이 증가할수록 꼬리화염(tag flame)의 길이가 길어지는 것을 볼 수 있다. 일반적인 확산화염에서는 연료와 공기의 혼합이 화염면 내부에는 농후하고, 외부로 갈수록 희박해지는 경향이 있으나, 이 화염꼬리 부근에서는 화염면 안쪽으로는 공기가 많아 희박한 상태이고 그 화염면 외부로는 연료가 많은 농후한 상태로 된다. 이는 노즐배열의 영향으로 주위의 공기가 고속으로 분사되는 연료와 함께 유입될 때, 노즐배열에서 센터영역으로도 공기가 유입되기 때문이다. 이러한 현상으로 인해 화염꼬리가 형성되고, 그 형성된

꼬리화염은 고유량까지 화염날림이 일어나지 않도록 하는 효과(anchoring)를 가지는 것으로 사료된다.

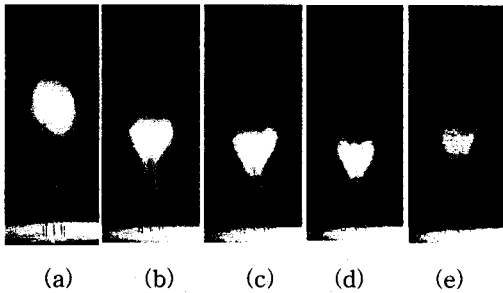


Fig. 5 Turbulent flame shapes by nozzle separation for circular 8 nozzles at $Q=700[\text{ml}/\text{min}]$ (a) $S/D=15.31$, (b) 18.37, (c) 21.43, (d) 24.49, (e) 27.55

Fig 5는 노즐배열이 원형인 경우, 노즐 당 연료유량을 $700\text{ml}/\text{min}$ 으로 고정시키고 노즐간격의 변화에 따른 화염형상의 모습을 보여주고 있다.

(a)에서부터 (e)까지 무차원화된 노즐간격이 점점 증가하면서 화염꼬리부분이 점점 짧아져서 노즐거리가 어느 정도 이상(원형배열 경우, $S/D=27.55$)이 되면 화염꼬리와 화염본체의 구분이 모호해진다. 반면에 무차원 노즐간격이 15.31보다 작게 되면 공기가 센터로 유입될 수 있는 공간이 형성되지 않아 이 꼬리화염은 나타나지 않고, 저유량에서 화염날림이 일어나게 된다.

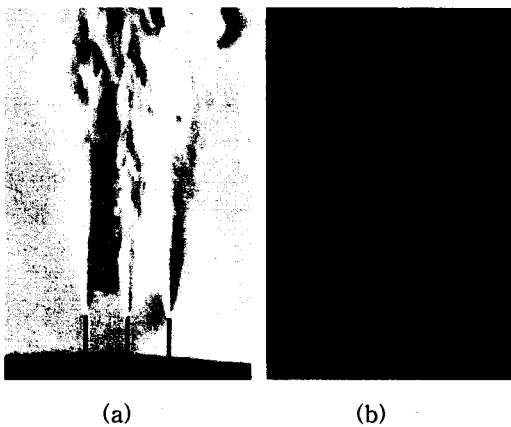


Fig. 6 Comparison of (a) spreading fuel and (b) flame for square 8 nozzles at $Q=500 \text{ ml}/\text{min}$, $s/d=16$

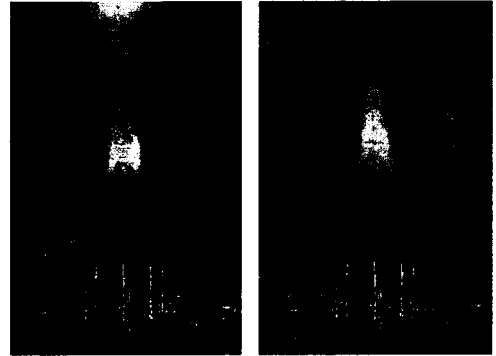
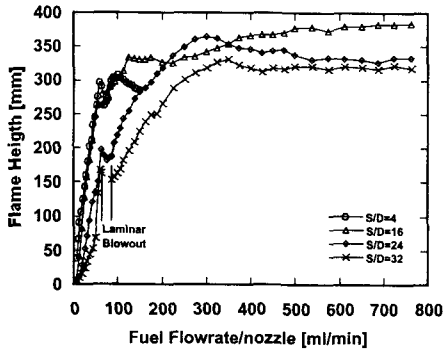


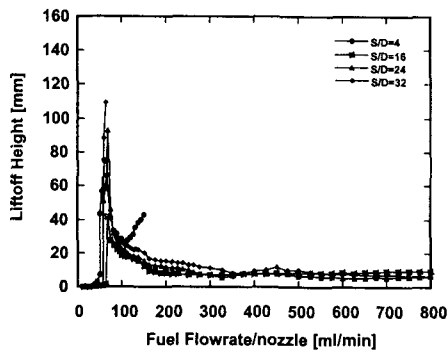
Fig. 7 Effect of entrained air on shown through smog for circular 8 nozzles at $S/D=15.31$ (a) $Q=500 \text{ ml}/\text{min}$, (b) $700 \text{ ml}/\text{min}$

Fig 6에서 (a)는 다수노즐에서 분사되는 연료의 거동을 쉐리렌기법으로 촬영하였고, (b)는 실제 화염의 모습을 보여주고 있다. 노즐에서 고속으로 연료가 분사되면 각각의 노즐에서 나오는 연료는 확장각(spreading angle)을 가지게 되어 근접한 노즐에서 나오는 연료와 합류(merging)하게 되는데, 이 때문에 꼬리화염의 측면은 외부공기의 침투(penetration)가 일어나지 못하게 되고, 연료로 둘러싸인 노즐내부의 공기는 외부의 연료유속에 의해 끌려 올라간다. 그리고 연료는 빠른 유속에 의해 강한 관성력을 가지고 있어 그 내부의 공백이 메워지기 위해서 외부의 새로운 공기가 화염의 기저부로 흡입된다. 즉, 꼬리화염면의 내부에는 외부 연료의 빠른 유속에 의한 운동량(momentum) 전달로 인해 강한 흡입(suction) 효과가 일어난다. 그리하여, 외부의 공기는 화염밀면을 통하여 화염의 중심축을 따라 흡입되면서 난류에 의한 연료와 공기의 예혼합적인 특성보다는 확산이 지배적인 연소가 일어난다. 이러한 특성에 의해 꼬리화염이 형성되는데, 이 부분은 일반적인 예혼합화염에서 산화제와 연료의 확산진행방향과 반대의 거동이 일어난다. 화염면의 내부는 산화제가 많은 희박한 조건이 되고, 화염면의 외부는 연료가 많은 농후한 상태가 되어 일반적인 확산화염의 산화제와 연료의 확산진행과 반대로 일어난다. Fig 7에서는 스모그에 의해 배열된 노즐내부로 외부 공기가 어떻게 유입되는지를

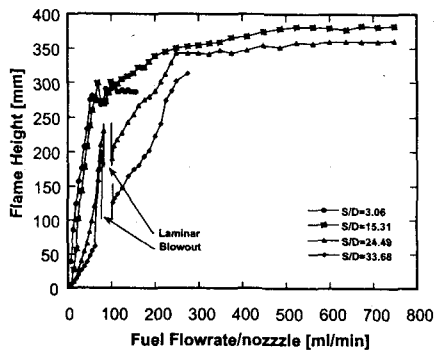
가시적으로 보여주고 있다. 무차원화된 노즐간격이 15.31인 경우, 노즐 당 연료유량이 (a)는 500ml/min이고 (b)는 700ml/min이다.



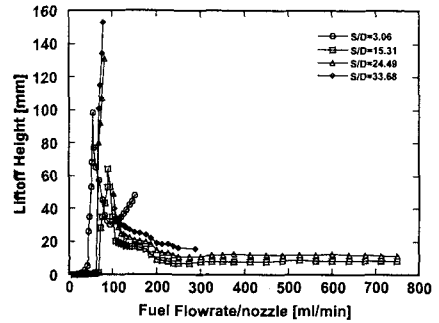
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 8 Effect on nozzle distance and fuel flowrates

- (a) Flame height for square 8 nozzles
- (b) Liftoff height for square 8 nozzles
- (c) Flame height for circular 8 nozzles
- (d) Liftoff height for circular 8 nozzles

Fig. 7에서 (a)와 (b)는 사각형 노즐배열의 화염 길이와 부상높이를 나타내고, (c)와 (d)는 원형 노즐배열의 화염길이와 부상높이를 나타낸다. 두 노즐배열에서 화염길이를 보면, 이 등⁶의 연구결과와 동일하게 층류영역에서 화염의 길이가 단일 노즐과는 달리 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그리고, 난류영역으로 넘어가면서 사각형의 경우는 $S/D=16, 24, 32$, 원형인 경우는 $S/D=15.31, 24.49$ 에서 화염의 길이의 증가는 유량과 무관하게 거의 일정한 형태로 완만해지는 특성을 나타낸다.

화염의 부상높이를 보면 난류영역으로 가면서 그 높이가 일정하게 되는데, 사각형의 노즐배열인 경우, 노즐 당 유량이 150ml/min 근처에서 부상높이가 일정하다가 약간 낮아지고 다시 일정한 특성을 가지고, 원형인 경우는 190ml/min 근처에서 동일한 현상이 나타나는데, 이는 그 유량 근처에서부터 화염 지지부의 센터영역으로 다량의 공기가 유입되면서 꼬리화염의 형성이 시작되기 때문이다.

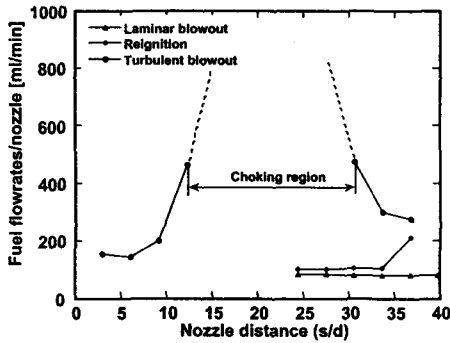


Fig. 9 Effect of nozzle separation distance on blowout flowrates

Fig. 9는 노즐배열이 원형인 경우에 대하여 각각의 노즐거리에서의 화염날림유량을 나타낸다. S/D=13~30 구간에서는 상대압력(gage pressure)이 3.5atm일 때 노즐 당 연료유량이 860ml/min에서 초킹(choking)현상이 일어나게 되어 더 이상 유량을 증가시킬 수가 없었고, 또한 화염날림도 일어나지 않았다. 즉, 이 영역에서는 화염이 아주 안정적인 상태가 된다. 초킹현상이 일어날 때의 유량을 직경 0.97mm의 단일노즐과 비교하면 5.4배의 화염날림유량이 증가하는데, 이는 이등⁽⁶⁾의 연구결과인 다수노즐에서 단일노즐보다 화염날림유량이 3.3배 증가에 비하여 크게 증가했을 뿐만 아니라, 리저버의 압력을 상승시켜 연료의 유량을 증가시키더라도 화염날림이 일어나지 않고 그 이상의 고유량까지 연소시킬 수 있다.

4. 결론

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

(1) 다수노즐에 있어서 최대화염날림이 일어나는 노즐거리의 영역에서는 센터노즐은 주위 공기의 유입을 방해하여 화염날림유량을 감소시키는 역할을 하였다. 즉, 다수노즐에 의한 연소에서 화염의 안정화를 위해서 노즐배열은 센터영역의 노즐을 배제시켜야 된다.

(2) 다수노즐의 배열에 있어서 중앙이 빈 배열 형태, 즉, 사각형 또는 원형인 경우에 꼬리화염(tag flame)이라는 특이화염형상이 나타났다.

(3) 원형으로 8개의 노즐을 배열한 경우, 노즐 거리가 13~30사이에서 최대 화염날림유량이 동일면적의 단일노즐보다 5.4배 이상 증가하였다.

후기

본 연구는 2000학년도 연소기술센터로부터 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 이종철, 1986, "2개의 원형 노즐에서 분출되는 층류 확산화염의 상호작용에 한 연구," 공학석사학위논문, 고려대학교.
- (2) 김호영, 전철균, 1991, "기체확산 화염간의 상호작용," 대한기계학회논문집 제15권 제1호, pp. 355~365.
- (3) 전철균, 1993, "상호작용하의 층류 확산 화염에서 NO의 생성," 대한기계학회논문집, 제17권 제1호, pp. 190~199.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 이승, 이병준, 2001, "상호작용하는 부상화염에 특성에 관한 연구," 대한기계학회 논문집 제25권 제4호, pp. 461~466.