

# 메탄 비예혼합 상호작용 화염의 특성

이병준<sup>†</sup>, 김진현<sup>\*</sup>

## Characteristics of methane non-premixed multiple jet flames

Byeong-Jun Lee and Jin Hyun Kim

**Key Words:** multiple jet flame(다수 화염), interaction(상호작용)

### Abstract

It has been reported that if eight small nozzles are arranged along the circle of 40 ~ 72 times the diameter of single nozzle, the propane non-premixed flames are not extinguished even in 200m/s. In this research, experiments were extended to the methane flame. Nine nozzles were used- eight was evenly located along the perimeter of the imaginary circle and one at the geometric center. The space between nozzles,  $s$ , the exit velocity and the role of the jet from the center nozzle were considered. On the contrary to the propane non-premixed case, the maximum blowout velocity for the methane diffusion flame was achieved when small amount of fuel is supplied through the center nozzle and  $s/d$  equals around 21. In the laminar region, the flame attached at the center nozzle anchored the outer lifted flames.

#### 기호설명

$d$  : 노즐 직경       $s$  : 인접 노즐사이의 거리  
 $Q_{bo}$  : 화염날림 유량 [ml/min]

#### 1. 서론

여러개의 노즐을 사용하면 화염의 길이가 줄어들어 가정용 보일러나 난방기의 크기를 줄일 수 있으므로 공간이용의 효율성을 높일 수 있다. 각각의 노즐에서 형성된 화염의 거리가 가깝게 되면 화염들은 서로 영향을 주고받는 화염상호작용

[1-8]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<sub>2</sub> 농도분포, 온도분포 등에 영향을 미치게 된다. 또한, 화염의 상호작용은 단일 화염에서보다 화염이 꺼지는 유량을 증가시켜 화염을 안정화시키는 효과가 있다[4-8].

Lee 등[5]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 화염날림 유량을 더욱 증가시키기 위하여, 9개까지의 노즐을 사용하고 노즐의 배열형태, 노즐수,

<sup>†</sup> 영남대학교 기계공학부

E-mail : bjlee@yu.ac.kr

TEL : (053)810-3526 FAX : (053)810-4627

<sup>\*</sup> 영남대학교대학원,

(현재) 한국기계연구원 복합재료그룹

유량 및 노즐간격을 변화시킨 실험[7]으로부터, 중앙부노즐 없이 8개의 노즐을 원형 혹은 matrix 형태로 배열하고 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 NO<sub>x</sub> 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.

지금까지의 연구는 프로판에 대한 연구였다. 노즐이 서로 가까워지면 연료로 공급되는 산소가 결핍되기 때문에 화염의 상호작용이 발생하는 것 [3]이므로, 프로판에 비하여 필요한 공기량이 40%밖에 되지 않는 메탄화염은 상호작용 특성이 다를 것임을 예견할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 메탄 비예혼합 상호작용화염의 특성에 관하여 살펴보고, 프로판 상호작용화염의 특성을 온도분포로부터 살펴보기로 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

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

연료(CH<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)와 공기는 각각의 질량유량계(mass flow controller; MKS)에 의해 유량이 조절된 후 유량분배기 직전에 혼합되어, 유량분배기 선단부에 등원주각으로 놓인 개별노즐(내경 0.31mm, 길이 300mm, 스테인리스)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 51mm 이다. 노즐은

중앙노즐의 윗면으로 6mm 돌출되게 설치하였다.

확산화염과 부분예혼합화염 및 동축류 화염에 관한 연구를 위하여 외경 94mm인 동축류 버너를 사용하였다. 외부로 공급되는 공기의 균일한 출구 속도를 얻기 위하여 셀의 크기가 1mm\*1mm 인두께 50mm의 허니컴, 직경 2mm의 스테인리스 구슬층과 철망을 사용하였다.

또한 외부공기의 유입차단, 공해물질 측정을 위해서 동축류 버너 외부에 길이 60cm의 석영관을 설치하였다.

동축류의 실험 및 농도측정과 관계없는 실험은 노즐을 15cm\*15cm에 가공된 노즐고정용 판에 삽입하여 수행하였다.

연소중에 발생하는 공해물질을 측정하기 위해서 화염 중앙 상부에 sampling probe를 설치하였다. 프로브는 내경 4mm의 석영관을 프로브에 의해 화염에 미치는 영향을 줄이기 위하여 'ㄱ' 형태로 구부렸으며, 그 끝을 급격히 축소시켜 내경 0.5mm의 기체흡입구를 만들었다. 구부린 부분으로부터 기체 흡입구까지는 10cm 이며, Fig.1에서 프로브의 수평부분은 물로 냉각시켜 반응을 동결시켰다. 흡입된 배출가스는 수분을 제거한 후 NOVA사의 CO / CO<sub>2</sub> / O<sub>2</sub> / NO<sub>x</sub> 분석기를 사용하여 분석하였다. NO<sub>x</sub>의 값은 동일한 산소농도에 대한 값으로 변환시키기 위하여 5% O<sub>2</sub>를 기분으로 변환하였다.

노즐간의 거리  $s$ 와 노즐직경  $d$ 를 무차원한

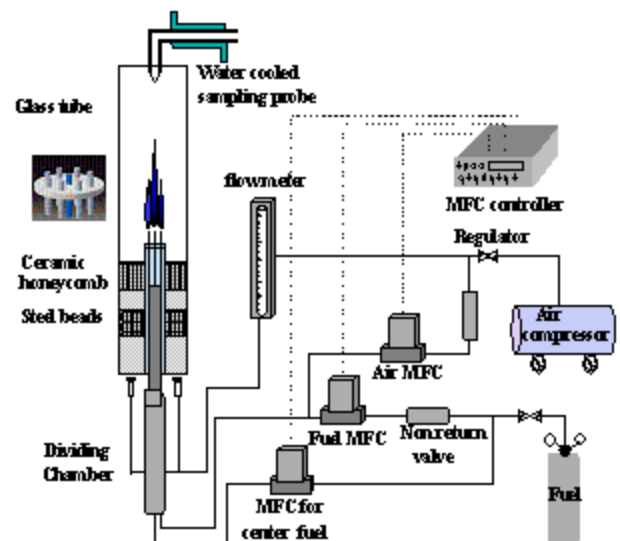


Fig.1 Experimental apparatus

s/d를 변화시키면서 화염날림 특성을 연구한 선행연구[7]에서, 배열중앙에 노즐없이 8개의 노즐을 원형이나 matrix형태로 배열하고, s/d를 15~28으로하면 노즐출구에서 목막힘(choking)일어날 때에도 화염날림이 발생하지 않음을 보였다. 또한 이 때의 화염은 청염으로, 내부 재순환이 화염을 안정화시킨다는 것을 보였다. 따라서 본 연구에서는 노즐의 수를 8 또는 9개로 하고 원형배열을 사용하여 실험을 수행하였다. Fig. 1의 석영관 옆에는 본 실험에서 사용한 노즐배열의 개략도를 나타내었다.

### 3. 실험결과 및 검토

#### 3.1 프로판 화염의 온도장 비교.

프로판 비예혼합화염의 경우에 노즐배열 중앙에 노즐이 없는 경우가, 내부 재순환에 의해 중앙노즐이 있는 경우에 비하여 안정함을 화염 밑면 주위의 온도측정이나 Schlieren 기법으로부터 보였다[7,8]. 그러나 화염의 전체 특성이나 NOx 생성 특성을 밝히기 위해서는 화염전체의 온도장 측정이 필요하다.

온도측정을 위하여 직경 0.127mm의 백금/백금 로듐 10%의 합금인 s-type 열전대를 사용하였으며, 각 점은 500개의 측정값을 평균하였다. Fig. 2는 배열 중심의 노즐 유무와 공기 혼합에 따른 화염밑면의 온도분포를 나타낸다. 노즐과 노즐 사이의 중심과 배열의 중심을 통과하는 선과, 배열의 중심선이 이루는 평면에서 온도측정을 수행하였다. 그래프에 표시한 온도는 열전대로부터의 복사, 전도 및 대류 효과에 대한 보정은 하지 않은 값이다. Fig.2의 모든 화염은 부상화염이며 높이 0mm는 노즐의 선단부이다. 노즐 배열의 중심부에 노즐이 있는 경우(a)는 화염의 상류가 외부와 온도가 동일하나, 중앙에 노즐이 없는 경우(c)는 배열 내부에 고온 영역이 형성됨을 볼 수 있다. 이는 기연가스의 내부 재순환부에 기인한다.

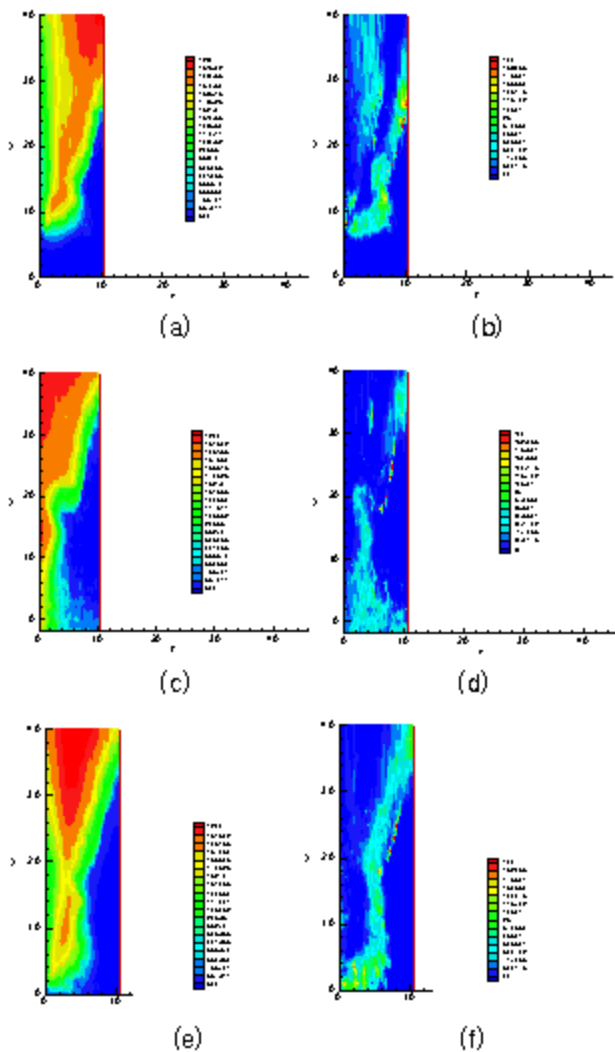
9개의 노즐을 사용하고 동일한 연료량을 공급하는 (a)의 경우에는, 중심축을 따라가면서 저온 영역이 형성되고 화염이 있는 바깥영역에만 고온임을 볼 수 있다. 이는 고속으로 공급되는 중앙부의 연료를 연소시킬 만큼 충분한 공기가 화염의 중앙부로 공급되지 않는 것에 기인한다고 사

료된다. 이에비하여 외부 8개의 노즐에만 연료를 공급하는 (c)의 경우는 화염 내부의 재순환과 산화제의 유입(entrainment)에 의하여 배열중심축을 따라 반응이 일어나고 있음을 볼 수 있다. 중심축을 따라 하류로 가면서 온도가 증가하다가 주연소영역이 되는 20mm 부근에서 온도가 감소하였다가 다시 증가함을 볼 수 있다. 이는 갑자기 화염의 면적이 증가하는 주연소영역(높이 25mm 부근)이 부력효과에 의하여 공기를 더 많이 유입하는 것에 기인한다고 사료된다. 전체적으로 (c)의 경우는 (a)나 (e)의 경우에 비하여 고온 온도분포임을 볼 수 있다. 8개의 노즐을 원형배열하고 여기에 연료를 당량비 40으로 공급하고, 중앙부에는 외부노즐의 40% 연료만을 공급한 경우(e)는, 외부유입공기와 외부노즐로부터 공급되는 공기에 의하여 약 40mm 부근에서 중심축상에 고온영역이 나타남을 볼 수 있다. 이 경우에도 주연소영역이 시작되는 18mm 부근에서 화염부의 온도가 감소하는 부분이 존재함을 볼 수 있다. 이것도 주연소영역의 면적증가에 따른 연료연소량 증가 및 이에따른 기연가스 유속증가에 의한 유입공기 증가에 기인하는 것으로 사료된다.

미연가스의 재순환 영역과 화염의 섭동이 일어나는 영역을 살펴보기 위하여 온도성분을 평균값과 변동성분으로 분리하였다. 즉,

$$T = \bar{T} + T_{rms} \quad (1)$$

이때 여기서  $T_{rms}$ 는 온도의 변동성분으로 root-mean-square 값이다.  $T_{rms}$ 가 클수록 온도의 변동 즉, 화염면이 섭동(fluctuation)하거나 미연가스와 기연가스의 교차가 큰 것을 의미한다. 중앙부노즐이 있는 Fig. 2의 (b)에서는  $T_{rms}$ 가 화염기저면 보다 하류에서 중심선 영역과 화염 바깥면에서 큼을 볼 수 있다. 이는 중심으로 공급되는 연료의 연소와 화염면 섭동에 기인하는 것으로 사료된다. 중앙부 노즐이 없는 Fig. 2 (d)의  $T_{rms}$ 값은 화염의 외곽과 화염밑면에서 큰 것을 볼 수 있다. 또한 교리화염과 주연소영역이 만나는 곳 주변부의 온도변동 성분이 큰 것을 볼 수 있다. 이는 내부 재순환에 의하여 기연가스가 부상높이 이하로 내려오고 외부의 찬 공기와 섭동하며 만나는 것에 기인하는 것으로 사료된다. 부분예혼합의 경우(f)는 9개의 노즐을 쓰는 (b)의 경우에 비하여, 온도변동이 심한 부분이 화염의



**Fig. 2** Effect of center nozzle on the temperature fields(a, c, e) and temperature variations (c, d, f),  $T_{ms}$ , for  $s/d=21.4$ ,  $Q_{F,unit}=600\text{ml/min}$  and (a), (b) : for with center-nozzle, (c), (d) : for without center-nozzle cases, (e), (f) :  $\phi = 40$  and  $Q_{F,center}/Q_{F,outnozzle} = 0.05$ .

바깥면으로 존재함을 볼 수 있다. 이러한 화염내부의 섭동영역의 차이는 내부로 공급되는 공기의 차이에 기인한 것으로, 이것이 반응으로 연결되어 NO의 생성에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

### 3.2 메탄 연료의 화염날림 특성

상호작용으로 프로판 화염의 화염날림 유속을 증가시킬 수 있었으므로, 동일한 방법으로 완전연소에 필요한 공기량이 40%밖에 되지않는 메탄

화염의 화염날림 유속도 증가시킬 수 있는지 살펴보았다.

프로판을 부분 예혼합화염의 경우[8]에는, 안정한 유속범위를 넓히기 위하여는, 비예혼합의 경우와 달리 중심부에 노즐을 사용하고 이 중심노즐에 순수 연료를 공급하여야한다. 즉, 부분예혼합의 경우는 비예혼합의 경우에 비하여 화염을 안정화시켜주는 중심부에 상대적으로 공기의 양이 많기 때문에 중앙부로 약간의 연료를 공급하여 화염을 안정화시킬 수가 있었다.

8개의 노즐을 원형배열한 상호작용하는 메탄화염은  $s/d$ 에 따라 화염날림 유량이 영향을 받게되나, 단일노즐당 최대 1000ml/min에서 소염이 일어났다.(Fig. 3 참조). 중심부 노즐에 연료공급이 없는 경우  $s/d=12$  에서 화염날림 유량이 최고였으나 매우 불안정하고 섭동이 심하였다.  $s/d=15$ 로 한 경우가 가장 안정하면서도 화염날림 유량을 높일 수 있었다. 화염형상은 프로판 다수난류 비예혼합화염의 꼬리화염(tag flame)과 유사하였다.

메탄을 완전연소시키는데 필요한 공기의 양이 프로판의 40%이므로, 동일한 형상이면 화염을 안정화시키는 곳의 공기가 jet의 유입(entrainment)에 의해 과잉으로 공급될 수 있음을 추론할 수 있다. 이를 프로판 부분예혼합화염의 경우와 연관시켜, 중앙부에 약간의 메탄연료를 공급하면 화염을 안정화시킬 수 있을 것이라는 아이디어를 얻게되었다.

$s/d=21$ 이고 센터노즐로 외부노즐들에 공급되는 연료의 5%만을 공급하는 경우에 대하여, 외부노즐 하나에 공급되는 연료유량에 따른 화염의 형상 변화를 Fig.4에 나타내었다. 연료유량이 적을 때에는 화염이 개별적으로 노즐에 붙은 형태로 존재하나, 연료유량이 증가하면 중심노즐의 화염은 노즐부착화염의 형태로 존재하나, 외부노즐 화염은 split 화염의 형태로 부상되어 존재하게 된다(b). 희석하지 않은 질소화염은 층류에서 부상하지 않는다고 알려져 있으므로, 부상한 외부화염은 중앙노즐 화염에 의하여 공급되는 중간생성물 및 고온 생성물에 의하여 화염이 존재하는 것으로 사료된다.

외부화염이 꺼지더라도 중앙화염은 주위 공기의 유입으로 안정하게 존재하게 된다(c). 이와 같이 외부화염이 꺼지고 중앙화염만 존재하는 상태를

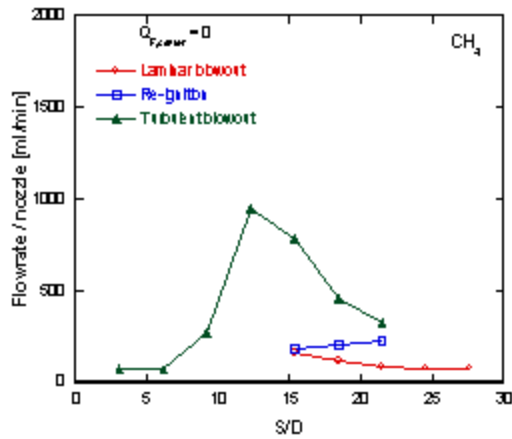
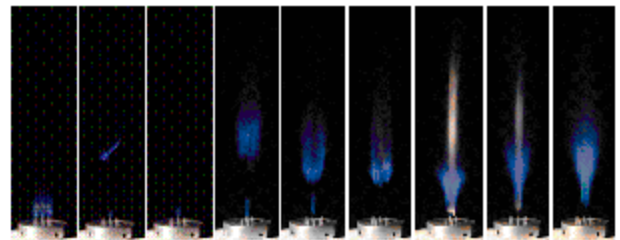


Fig. 3 Blowout characteristics of CH<sub>4</sub> flame for without center nozzle case.

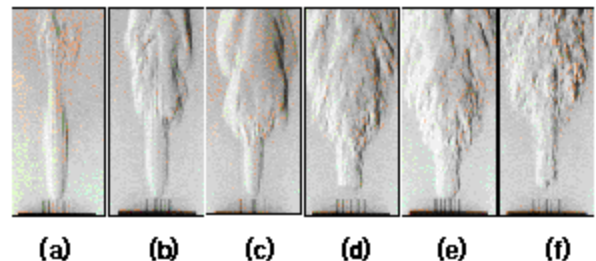
층류화염날림이라고 표기하기로 한다. 유량증가에 따라 중앙화염의 길이는 증가하고 유량 150ml/min에서 외부화염은 중앙화염에 의하여 재착화되고, 착화된 화염은 그 밀면까지의 높이가 감소하는 천이영역을 지나 난류화염으로 변하게 된다. 단일노즐에서 화염날림이 발생하는 80ml/min의 연료가 중앙노즐로 공급되는 경우 중앙화염의 화염날림이 발생하였다. 이는  $s/d=21$ 이고 외부 노즐당 200ml/min에서는 중앙부 노즐이 외부노즐의 영향을 받지않음을 의미한다. 외부노즐당 유량이 500ml/min이상인 경우에는, 일반적으로 매연이 생성되지 않는 메탄화염도 센터노즐이 있는 프로판 부분예혼합 화염의 경우와 마찬가지로 중심부에 길게 늘어진 매연이 형성된다. 이러한 매연은 중앙부에서 공급되는 연료가 산화제의 공급이 차단된 상태에서 고온의 화염영역을 통과하면서 열해리되어 생성되는 것으로 사료된다. 1000ml/min이상에서는 매연이 소멸되며, 노즐출구에서 초킹될 때까지 화염형상의 변화가 없이 유지된다. 이는 유속이 증가에 따라 매연이 생성되고 성장되는데 필요한 시간적 여유가 감소하여 매연이 저감되는 것으로 판단된다.

Fig 5는 Fig. 4와같이  $s/d=21$ 이고 외부노즐들에 공급되는 연료의 5%만을 중앙노즐에 공급하는 경우에 대한 메탄화염의 유동장을 가시화한 것이다. 중앙노즐이 있는 부분예혼합 프로판 연료와 마찬가지로 메탄연료의 경우도 기연가스가 노즐 선단부까지 내려오지 않음을 볼 수 있다.

층류화염날림이 일어난 (a)의 경우 전술한 바와 같이 중앙노즐에만 화염이 층류부착화염의 상태로 존재하기 때문에 층류화염의 슬리텐사진과 동일하게 나타난다. 이러한 중심 층류화염이 소멸된 (d)의 경우는 전체화염이 부상하여있으므로 노즐과 화염면 사이의 영역이 냉간유동으로 나타남을 볼 수 있다. 중앙노즐로 분사된 연료에 의해 화염밀면으로부터 매연생성이 시작되어 후류로 길게 뻗어있는 (e)는 Fig.4의 (g)와 동일한 경우로서 화염의 선단부가 노즐 근처에 있으므로 농도구배가 노즐부근부터 남을 볼 수 있다. 연료유량이 증가하여 노즐출구에서 초킹된 (f)의 경우는 프로판 부분예혼합 화염과 유사하게 화염선단부와 노즐사이가 냉간유동임을 알 수 있다. 이와 아울러 중앙 노즐의 속도가 크고, 화염밀면 이하에서 매연생성이나 연소가 일어나지 않기 때문에 화염선단 중앙부가 불룩하게 들어간 것을 볼 수 있다.



(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) (h) (i)  
Fig. 4 CH<sub>4</sub> flame shapes as function of fuel flowrates per outer nozzle ( $Q_{F, nozzle}$ ) equal (a) 44, (b) 69, (c) 69, (d) 150, (e) 180, (f) 200, (g) 560, (h) 880, (i) 1500 [ml/min] when  $Q_{F, center}/Q_{F, outer}=5\%$



(a) (b) (c) (d) (e) (f)  
Fig. 5 Flow visualization for methane flame for  $s/d=21$  and  $Q_{F, nozzle} =$  (a) 125, (b) 150, (c) 180, (d) 500, (e) 560, (f) 1500 [ml/min] when  $Q_{F, center}/Q_{F, outer}=5\%$

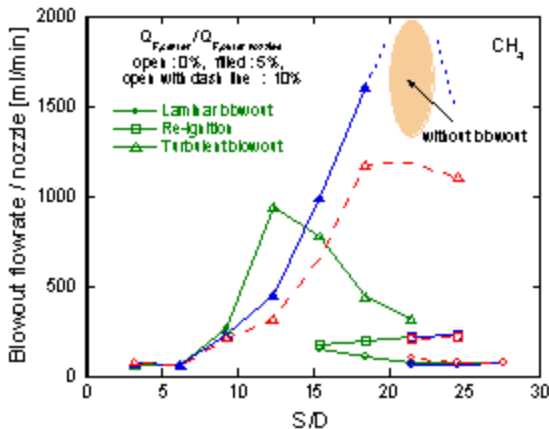


Fig. 6 Effect of the amount of fuel which supplied to the center nozzle on the stability of CH4 flame.

Fig. 6은 원형 배열 노즐에서 중앙노즐에 공급되는 연료와 외부노즐들에 공급되는 총연료의비 ( $Q_{F,center} / Q_{F,outer nozzles}$ )에 따른 메탄화염의 안정성을 나타낸다.  $Q_{F,center} / Q_{F,outer nozzles}$ 를 0으로부터 증가시킴에 따라 화염의 안정성이 증가하였다가 감소함을 볼 수 있다. 즉, 중앙노즐로 연료를 공급하면 메탄상호작용화염의 안정성을 넓힐 수 있음을 보여준다. 난류 상호작용화염의 화염날림 부근의 화염형상이 꼬리화염 형태(Fig. 4 i)를 하고 있고, 이 꼬리화염의 기저부가 일반적인 부상 화염과 마찬가지로 화염의 안정화에 기여한 것으로 판단된다. 꼬리화염이 형성되기 위해서는 외부 메탄 제트의 유속이 커야하고, 유속이 크게 되면 꼬리화염으로 유입되는 공기의 양이 증가하여 화염이 날아가던 것을, 중앙노즐에서 공급되는 연료가 과도한 공기를 담당하여 화염을 안정화시킨 것으로 사료된다. 중앙노즐로 공급되는 연료가 많은 경우에는, 유사한 이유로 연료과잉에 의한 화염날림이 발생한 것으로 사료된다. 외부 노즐과 동일한 양의 연료를 중앙노즐에 공급하는 경우( $Q_{F,center} / Q_{F,outer nozzles}=0.125$ )는 안정한 화염의 영역이 더 축소될 것임을 유추할 수 있고, 이는 중앙노즐이 없는 경우가 있는 경우에 비하여 더 안정하다는 기존의 연구와 동일한 결과이다.

#### 4. 결론

원형배열로 구성된 프로판 상호작용 화염의 온도장 측정과 메탄 비예혼합 상호작용화염에 대한 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 프로판 비예혼합 상호작용화염은 부분예혼합 화염에 비하여 화염내부에 온도 섭동이 큰 영역이 존재한다.
- (2) 메탄 비예혼합 상호작용화염은 중앙 노즐에 공급하는 연료량 제어와 노즐 간격 조절로 안정한 영역을 확보할 수 있었다.
- (3) 메탄 상호작용화염의 중앙 노즐에서 형성된 화염은 층류 화염의 안정화에 중요한 역할을 한다.

#### 후기

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

#### 참고문헌

- (1) Kim, H.Y., Chun, C.K., 1991, "The Interaction of Gaseous Diffusion Flames" *Trans. of KSME*, Vol. 15, No. 1, pp. 355~365.
- (2) Chun, C.K., 1993, "Production of NO in Interacting Laminar Diffusion Flames," *Trans. of 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., Lee, B.J., 2001, "Characteristics of Interacting Lifted Flames", *Trans. of 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 KSME(B)*, Vol. 27, NO. 5, pp. 1420~1426.
- (7) B.J. Lee, J.S. Kim And S. Lee, 2004, "Enhancement Of Blowout Limit By The Interaction Of Multiple Nonpremixed Jet Flames", *Combust. Sci. and Tech.*, vol 176, 481-497.
- (8) Lee, B.J. and J.H. Kim, 2004, "Nozzle configurations for partially premixed interacting jet flame to enhance blowout limits," submitted to *Trans. of KSME(B)*.