

보염기 주위의 연료액적크기와 연소특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Drop Size and the Combustion Characteristics around the Bluff-body

황상호* · 김덕줄**
S. H. Hwang, D. J. Kim

Abstract

This work was performed to investigate the distribution of the fuel droplet size around the bluff-body and the combustion characteristics. The bluff-body is used for the purpose of increasing the combustion efficiency by stabilizing the flame. Diameters of the bluff-body in this experiment are 6, 8, and 10 mm and the impingement angles are 30° , 60° , and 90° . The measurement points were at the distances of 20 and 30 mm axially from the nozzle. The geometry of the bluff-body influenced the spray shape and the combustion characteristics. The SMD was acquired by image processing technique (PMAS), and the mean temperatures were measured by thermocouple. In the condition of $\theta = 60^\circ$, the values of SMD are not greatly varied compared to the other conditions. As the angle of bluff-body was increased, the high temperature region was wider along radial direction. When the air-fuel ratio was larger than 5.2, the NO_x concentration was decreased, and an increase in the diameter of the bluff-body decreased the NO_x of emission.

주요기술용어 : Bluff-Body (보염기), Impingement angle(충돌각), SMD(사우타 평균직경), PMAS (입자운동해석장치), NO_x (질소산화물),

1. 서론

최근 들어 산업화가 가속화되면서 환경오염이 사회적으로 크게 문제화되고, 공해물질의 규제가 강화되면서 저공해 장치의 연구와 석유 자원의 한계성에 따른 세계적인 에너지 위기는 에너지의 합리적인 이용기술 개발에 대한 연구 개발의 필요성을 높이고 있다. 특히 에너지원의 대부분을 수입하고 있는 우리나라 실정으

로는 에너지 절약차원에서 액체연료의 사용절감과 효율적인 이용기술에 대한 연구가 급선무라고 할 수 있다.

액체 연료는 동력이나 에너지를 얻기 위해서 연소과정을 거치게 되고 일부를 제외하고는 역상반응이 아닌 증발 후 연료 증기가 산소와 반응하여 연소한다.

연소 형태는 휘발성에 따라 다르며 가솔린과 같은 휘발성이 높은 것은 증발부와 연소부로 분리하여 기체 연료와 유사하게 연소하고 증유와 같은 휘발성이 낮은 연료는 액상에서 열분해가 일어나 잔탄이 연소한다.

액체연료가 가지고 있는 문제점은 기화가 잘 안되어 착화가 어렵고 연소 시 배출되는 각종

* 부산대학교 기계기술연구소

** 부산대학교 기계공학과

공해 물질인 CO, SOx, NOx, soot 등이 많다는 것이다.

액체연료를 미립화하여 연소시키는 방식은 공업용로, 디젤기관, 가스터빈엔진 등의 연소장치에서 매우 중요하며 여러 기기에 있어서 그 비중이 점차 늘어가고 있는 추세이다. 이러한 분무연소의 기본과정은 단위 질량당의 표면적을 증가시킴으로서 연소 기간 동안에 열과 물질 전달이 원활히 이루어질 수 있도록 미세한 작은 액적으로 액체 연료를 미립화 시키는 것을 말한다.

미립화 방법으로는 초음파를 이용한 방법⁽¹⁾과 2유체 노즐을 이용한 방법 등이 있고, 2유체 분사 노즐은 기체의 속도가 낮은 영역에서는 미립화 특성과 연료의 분산분포의 특성이 나빠지는 단점을 가지고 있으며 공기 또는 액체 연료를 선화시켜 2유체의 상호충돌과 파동효과를 증대시킴으로서 양호한 미립화를 얻고자 하는 연구^{(2)~(6)}가 최근 활발히 진행되고 있다.

지금까지 분무 연소는 이론⁽⁷⁾과 실험⁽⁸⁾ 연구가 많이 수행되어왔으나 실험적 연구는 가스 연소와는 달리 안정된 화염을 얻기 어렵고 이론적 연구는 복잡한 유동 특성을 반영하는 것이 어렵기 때문에 실제 연소와는 많은 차이를 나타내고 있다.

1970년대 이후로 집단연소 모델이 제시된 후 몇몇 실험 연구가들에 의하여 분무화염의 구조^{(9)~(11)}가 가스 확산 화염의 구조와 유사함을 밝혔고 1990년대 이후로 양호한 미립화를 얻기 위해 Diesel 충돌 분무에 관한 연구⁽¹²⁾⁽¹³⁾가 이루어졌다.

연소과정에 있어서는 연소효율을 향상시키거나 대기오염물질 등의 생성을 억제하기 위해서는 화염의 안정화가 중요하므로 재순환 영역의 존재는 연소 유동장내의 연료와 산화제간의 접촉을 용이하게 하여 적절한 혼합기를 생성시키고 동시에 재순환 되는 고온의 연소 생성물로부터 열전달에 의해 화학반응에 필요한 지속적인 열이 공급되고 이로 인해 화염 전파속도와 유동속도가 잘 일치되는 영역이 생성됨으로서 화염의 안정화를 얻을 수 있다.

자동차, 항공기, 보일러 등과 같은 열기관에 대하여 고부하 연소와 더불어 소형화 경량화가 요구되고 고부하 연소를 위해서는 연소속도를 증가시켜야 하기 때문에 강한 난류유동을 동반

하는 것이 필수적이며 보염기를 설치하는 것이 한 방법이다.⁽¹⁴⁾

현재 분무 연소에서 화염에 가장 큰 영향을 미치는 인자가 분무 액적의 크기, 속도, 수밀도 그리고 이들의 상관 관계 등에 있다고 판단하고 이러한 분무 특성이 어떻게 연소장에 영향을 미치는가에 관한 연구는 아직 미미하다.

본 실험에서는 보염기를 이용하여 분사된 액체연료의 단위질량당 표면적을 증가시켜 미세한 액적들을 얻고, 연소시에 재순환 영역과 화염의 안정화로 연소 효율을 높여, 친환경적인 버너의 설계를 위한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 노즐과 보염기의 개략도이다. 1차 미립화용 공기가 내부에서 연료와 혼합되어 분사되는 노즐로서 연료 노즐의 직경은 0.1 mm이며, 2유체노즐 직경은 3.2 mm 이다. 노즐상부에는 각각 직경(D)이 23 mm와 32 mm, 두께가 1 mm, 길이(L)가 57.5 mm 인 원통관을 2중으로 설치하였다. 안쪽 관은 연소시에 가열되어서 분사되는 연료의 증발을 빠르게 하여 화염을 안정화시키고 바깥쪽 관은 2차 공기의 유입으로 인해서 가열된 안쪽 관의 온도저하를 막기 위한 것이다.

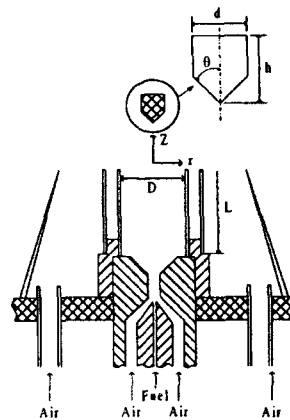


Fig. 1 Schematics of the nozzle and the bluff-body used in this study

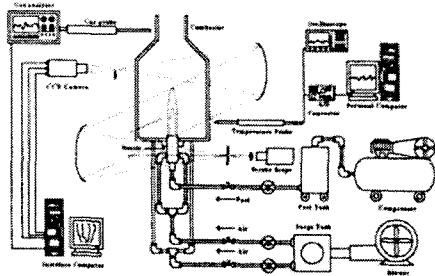


Fig. 2 Schematic diagram of an experimental apparatus

Fig. 2은 본 연구에 사용된 실험 장치 및 측정장치의 개략도이다.

본 실험을 위해서 제작된 연소기는 외부공기의 유입을 막기 위해서 4각의 밀폐형(300 mm × 300 mm × 360 mm)으로 제작하였으며, 연소기내의 화염을 직접 관찰하기 위한 가시창으로 두께 10 mm, 150 mm × 300 mm의 열처리 된 강화유리를 마주보는 두면에 설치하였다. 압축기에서 발생한 공기는 압력조절기에 의해서 0.2 MPa로 조절되어 연료를 가압하게 되고 분사시킨다. 1,2차 공기는 송풍기에서 생성되고 이때 발생하는 압력 맥동을 줄이기 위해 서지 탱크를 설치하였으며 유량계에 의해 유량이 조절되어 연소기 내로 공급된다. 연료는 경유를 사용하였고 연료 탱크내부의 가압된 공기에 의해서 노즐을 통해 분사된다.

2차 공기는 연소에 필요한 공기로서 노즐 주위의 4개의 구멍을 통해서 연소기 안으로 공급되고 분사 속도를 줄이고 적은 양으로 화염을 안정화시키기 위해 원뿔형 관을 이용하여 축방향과 동축으로 분사되는 공기의 방향을 화염쪽으로 향하게 하였다.

보염기는 분무된 액적에 최대한의 영향을 주며 화염의 형상에 영향을 미치지 않는 높이인 원뿔관 상단을 기준으로 10 mm의 위치에 부착될 수 있게 하였다.

Table 1은 본 실험에 사용된 보염기의 치수이다. 보염기의 직경(d)은 6 mm, 8 mm, 10 mm이고, 총돌각(θ)은 30°, 60°, 90°이며, 높이(h)는 15 mm를 가지는 원뿔 형상을 하고 있다.

1차 미립화용 공기의 양은 30 l/min, 35

Table 1 Dimension of the bluff body

Type	d(mm)	θ (°)
A	6	60
B	8	60
C-30	10	30
C	10	60
C-90	10	90

l/min, 40 l/min으로 하였다.

화염의 평균온도 측정은 직경 0.1 mm의 Pt/Pt-Rh 13%이 R-Type 수냉식 열전대를 사용하였으며, 노즐에 부착된 관의 상단을 기준으로 하여 축방향으로 20 mm, 30 mm의 위치에 연소기 한쪽면에 구멍을 내어 열전대를 삽입하였고 반경 방향으로는 2 ~ 3 mm간격으로 평균온도를 측정하였다. 열전대에 의해서 검출된 기전력은 오실로스코프를 통해 확인한 후 A/D 변환기를 통해 컴퓨터에서 오프라인 프로그램을 통해 시간 평균 온도를 구하였다. 이때, 복사와 전도에 의한 손실은 고려하지 않았다.

SMD의 측정은 영상 처리에 의한 입자 계측 방법의 일종인 PMAS를 이용하였다. PMAS 측정 장치는 발광시간이 매우 짧은 스파크 광원을 이용하여 분사 중의 분무 액적을 정지 화면으로 촬영하여 화상으로 저장한 후 입자분포 분석용 소프트웨어를 사용하여 분무 액적의 크기를 분석하여 평균 입경뿐만 아니라 입자 직경의 분포를 구할 수 있다.

2.2 실험방법

연소기내에 공급되는 연료는 20 cc/min으로 고정하고 1차 공기량은 보염기가 설치되지 않은 상태에서 화염을 유지시킬 수 있는 최고 공기량이 42 l/min이었고 화염의 안정화를 위해서 40 l/min으로 연료와 함께 연소실내로 분사되며, 2차 공기의 유량은 NOx의 대부분을 차지하는 Thermal NOx가 공기중의 질소 성분에 의한 것이므로 밀폐된 조건에서 화염을 안정화시킬 수 있는 최소량을 측정하여 2차공기량으로 하였으며 측정량은 80 l/min으로 연소실내에 일정하게 공급되도록 하였다.

3. 실험결과

3.1 액적의 축방향 속도

Fig. 3은 열선유속계를 이용하여 1차 공기량이 40 l/min 일 때 보염기의 충돌각 (θ)이 60° 이고 직경 (d)이 6, 8, 10 mm 인 경우의 축방향 평균 속도 분포이다. 보염기가 설치 되지 않은 경우보다 설치된 후의 평균 속도가 전반적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 보염기의 설치로 인해 발생한 충돌류가 주류를 반경방향으로 밀어내어 축방향의 운동량이 반경방향 속도성분으로 전환된 것으로 사료된다. $Z = 30$ mm에서 보염기가 설치된 경우 평균 속도 분포가 노즐의 중심부에서 반경 방향으로 이동하면서 서서히 증가하다 $r = 5$ mm 부근에서부터 감소하는 포물선의 형태를 가지는데 이것은 보염기에 의해서 주류가 축방향으로 직접 진행하지 못하고 충돌류와 부딪힌 후 보염기 후류의 압력 저하로 인해 약한 공기의 유동장이 형성되었기 때문이다. 그리고 동일한 충돌각 (θ)에서는 직경(d)이 증가할수록 중심부의 속도는 더 감소하고 최고 평균 유속은 감소하면 포물선의 변곡점은 반경방향으로 미세한 변화를 보였다.

Fig. 4는 1차 공기량이 40 l/min 일 때 보염기의 직경(d)이 10 mm로 일정하고 충돌각 (θ)이 30° , 60° , 90° 인 경우의 축방향 평균 속도 분포이다. Fig. 3에서처럼 보염기를 설치한 후의 평균 속도가 그렇지 않은 경우보다 전반적으로 감소한 경향을 나타내며, 동일한 직경(d)에서는 충돌각 (θ)이 증가할수록 중심부의 속도 감소 현상은 크게 나타나고 최고 평균 유속은 낮았으며 포물선을 그리는 평균 속도 분포 곡선의 변곡점은 반경방향으로 미세하게 변화는 것을 알 수 있었다.

그리고, 공기의 축방향 속도가 입자의 축방향 평균 속도에 가장 큰 영향을 미치므로 연료 분사시에도 비슷한 경향의 액적 속도 분포가 나타날 것으로 사료된다.

3.2 액적의 SMD 분포

다음은 연료가 20 cc/min이고 1차공기(Q_a)가 40 l/min, 2차 공기가 80 l/min으로 분사되는 상태에서의 SMD분포를 나타낸 것이다.

Fig. 5의 $Z = 20$ mm에서 보염기가 없는 경우와 상대적으로 충돌각이 완만한 $\theta = 30^\circ$ 가 반경방향 10~20 mm사이에서 감소하다 증가하는 유사한 경향을 보였다. 그리고, 보염기가 없는 경우 반경방향 10 mm에서 최고 SMD값이 나타났으며, 보염기가 설치된 후에는 최대 값이 반경방향으로 이동하였고, $\theta = 60^\circ$ 의 경우 반경방향으로 비교적 균일한 SMD분포를 보였다.

$Z = 30$ mm에서는 보염기가 설치된 경우 중심부의 SMD가 낮게 나타났는데 이것은 보염

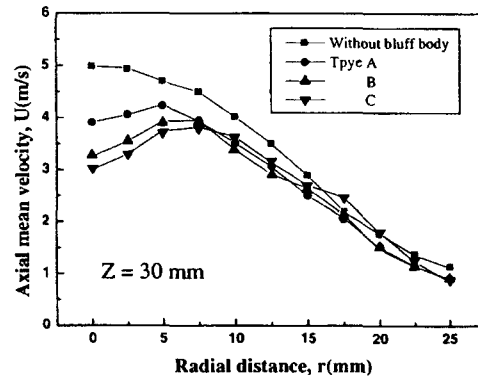


Fig. 3. Distribution of axial mean velocity for different diameters ($Q_{a,p} = 40$ l/min)

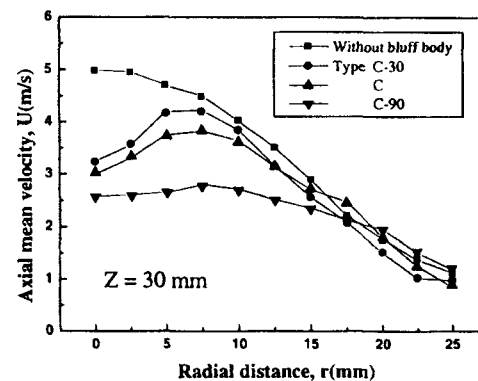


Fig. 4. Distribution of axial mean velocity for different angles ($Q_{a,p} = 40$ l/min)

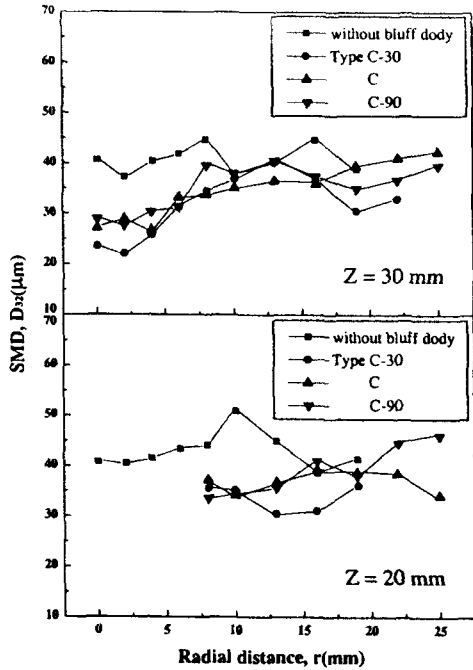


Fig. 5 Distribution of Sauter mean diameters of nonburning spray ($Q_a = 40 \text{ l/min}$)

기에 의해서 형성된 보염기 후면의 재순환유동에 의해 작은 액적들은 재순환류 안으로 들어 오지만, 상대적으로 큰 액적들은 관성모멘트가 큰 이유로 재순환류의 궤도를 벗어나 하류로 흘러가기 때문에 사료되며, $Z = 20 \text{ mm}$ 에서와 같이 $\theta = 60^\circ$ 에서 비교적 양호한 SMD 분포가 나타났다.

Fig. 6은 보염기 직경만이 다른 동일한 공기량과 충돌각을 가진 경우의 $Z = 30 \text{ mm}$ 에서의 SMD 분포를 나타내었다.

직경이 커질수록 비교적 균일한 분포를 나타내고 있으며 $d = 6 \text{ mm}$ 인 경우 반경방향 6 mm와 16 mm 부근에서 SMD가 보염기 직경이 증가할수록 낮아지면서 반경방향으로 거의 균일하게 변하고 있는데 이것은 보염기에 의해 분사각을 넓게 되어 액적들이 균일하게 분포한 것으로 생각된다.

Fig. 7은 $d = 10 \text{ mm}$, $\theta = 60^\circ$ 의 보염기를 이용해서 1차공기량(Q_a)만을 30, 35, 40 l/min으로 달리한 경우의 SMD분포를 나타내었다.

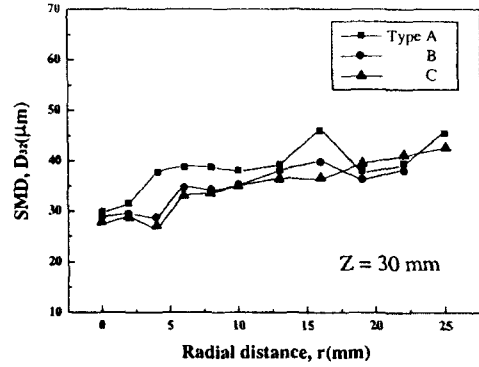


Fig. 6 Distribution of Sauter mean diameters of nonburning spray at $Z = 30 \text{ mm}$ ($Q_a = 40 \text{ l/min}$)

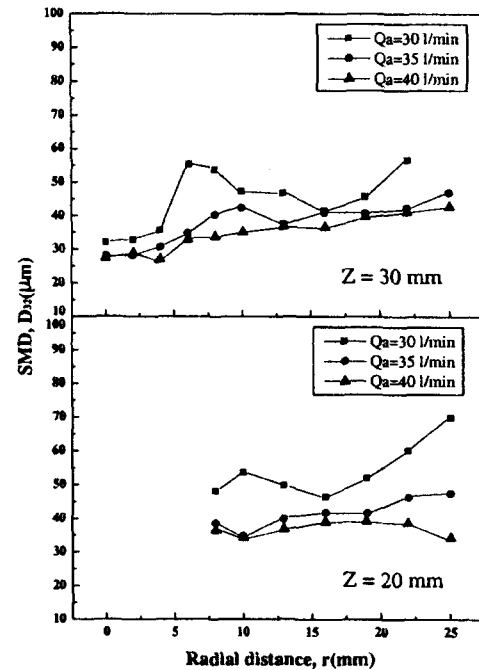


Fig. 7 Distribution of Sauter mean diameters of nonburning spray, Type C

$Z = 20 \text{ mm}$ 에서 $Q_a = 30 \text{ l/min}$ 의 경우 반경방향 6 mm에서 큰 값을 가지는데 이것은 분사된 액적들이 보염기 면을 부착용집 된 후 보염기 면에 액막이 형성되고 미립화 공기에 의해 2차 분열되는 액적들이 많은 이유로 다른 위치에 비해 큰 값을 가지게 단점이 있지만, 연소시에는 보염기의 표면온도에 액적들은 증발하게되

고 이 문제는 해결될 것이다. 35, 40 l/min에서는 공기량이 많은 40 l/min에서 상대적으로 더 큰 충격에너지에 의해 반경방향속도가 증가하여 전체적으로 완만하게 증가하는 경향이 나타난 것으로 사료된다. 따라서 두 경우 모두 공기량이 많을수록 균일한 분포가 나타나는 것을 알 수 있다.

3.3 화염의 가시화

Fig. 8은 각 보염기와 공기량 변화에 대한 화염의 순간 슈리렌 사진을 나타낸 것으로 보염기에 의해서 혼합기의 전단층이 보염기의 직경과 각이 클수록 반경방향으로 크게 형성되어 화염의 형상 역시 반경방향으로 넓어지게 되며, 이 영향은 SMD분포에서도 알 수 있었다.

3.4 온도분포

Fig. 9와 Fig. 10은 공기유량, 보염기직경, 보염기 충돌각 변화에 따른 반경방향 온도분포를 나타낸 것이다.

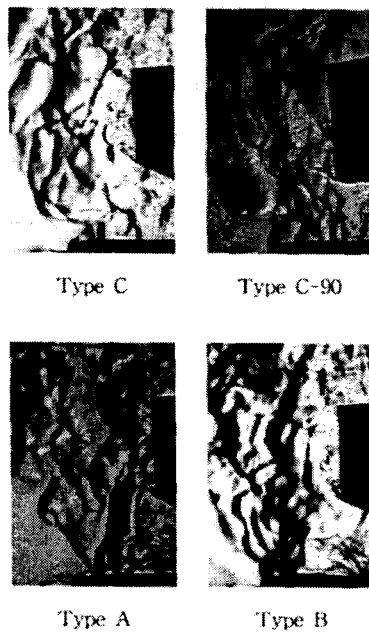


Fig. 8 Instantaneous schlieren photographs of flames

두 그래프 모두 보염기의 각이 커질수록 반경방향으로 고온의 온도분포가 이동하는 것을 알 수 있으며 이것은 보염기에 의해서 연료액적의 주류가 반경방향으로의 이동과 액적의 수밀도 증가로 인해 아래와 같은 온도분포를 나타낸 것으로 사료된다.

최고 온도값은 거의 동일하지만 고온영역의 분포가 직경이 클수록 반경방향으로 이동하였다.

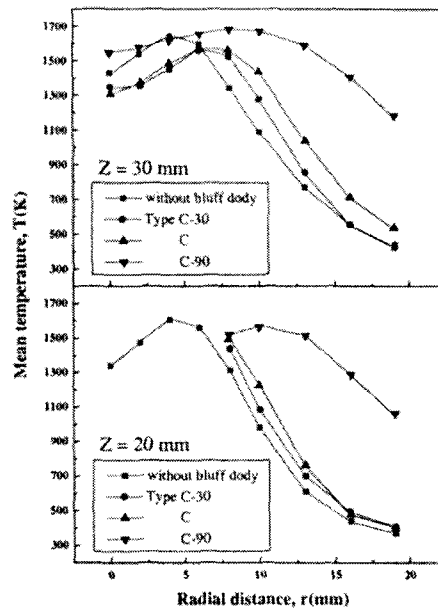


Fig. 9 Radial distribution of mean Temperature for spray flame ($Q_a = 40$ l/min)

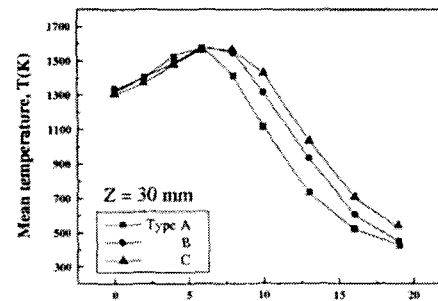


Fig. 10 Radial distribution of mean temperature for spray flame ($Q_a = 40$ l/min)

3.5 배출물 특성

Fig. 11은 본 실험 장치에서 발생한 CO의 양을 배기가스 분석장치를 이용하여 측정된 값으로 CO는 연료와 공기의 혼합불량과 고온에서의 열해리에 의한 것인데 본 실험에서는 2000K 이상의 고온영역은 존재하지 않으므로 공연비가 적은 경우 CO의 다량 발생은 혼합불량에 의해 발생한 것으로 사료되며 본 실험에서는 보염기가 부착된 경우 70~80%정도 CO의 양이 감소하였는데 이것은 보염기의 부착으로 연료와 공기의 혼합상태가 양호해졌기 때문으로 사료됩니다.

Fig. 12은 동일조건에서 보염기의 각이 다른 경우이고, Fig. 13는 보염기 직경만이 다른 경우의 NOx 농도를 공연비(Air-fuel ratio)에 따라서 나타낸 것으로, Fig. 12에서 보염기가 없는 경우는 공연비가 증가할수록 NOx의 값도 증가하였고 이것은 공기속의 많은 질소 성분이 반응을 했기 때문이며, 보염기가 설치된 경우는 공연비 5.2 이상에서는 감소하고 있는데 이것은 앞의 비연소시 SMD분포에서처럼 연료가 균일하게 분포되고 양호한 미립화로 연료와 공기의 혼합이 잘되어 연소가 잘 이루어졌기 때문이다.

Fig. 13에서는 보염기의 직경이 증가할수록 NOx 값은 감소하는 것을 알 수 있는데 이것은 Fig. 6에서 알 수 있듯이 $d = 10 \mu\text{m}$ 의 보염기로 인해 상대적으로 작은 연료액적이 분포하게 되고 이 액적들이 연소를 위해 유입된 공기와의 반응시간이 짧아져 NOx의 발생이 감소한 것으로 사료된다.

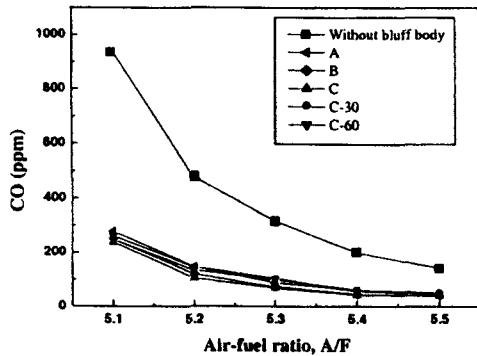


Fig. 11 Distribution of CO concentration for different diameters and angles

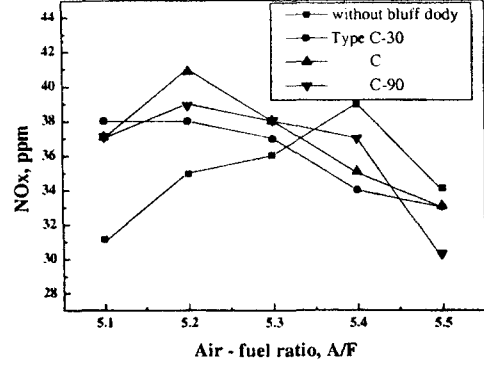


Fig. 12 Concentration of NOx for different angles

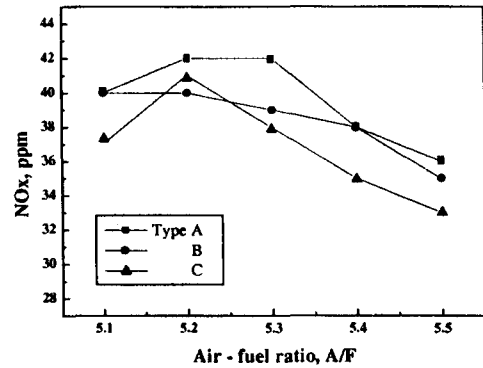


Fig. 13 Concentration of NOx for different diameters

4. 결론

보염기를 이용하여 분사된 액체연료의 재순환 영역, 화염의 안정화 및 연소 효율을 높이기 위한 본 실험에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 비연소시에 $Q_a = 40 \text{ l/min}$, 축방향 $Z = 20 \text{ mm}$ 와 $Z = 30 \text{ mm}$ 에서 Type C 인 경우가 반경방향으로 균일한 SMD분포를 나타내었다.
2. 비연소시에 $Q_a = 40 \text{ l/min}$, $\theta = 60^\circ$ 일 때 보염기의 직경이 커질수록 액적들이 균일하게 분포하고 SMD값은 감소하게 되고 화염의 최고 온도값은 반경방향으로 이동하였다.
3. 비연소시 Type C 에서 공기량이 증가할수

록 SMD값은 낮아졌고, 보염기 각이 커질수록 반경방향으로 고온영역이 넓게 분포하였다.

4. 연소시 검출된 CO의 양은 보염기를 설치하였을 경우 70~80 %감소 하였으며, NO_x의 양은 보염기가 없는 경우는 공연비가 증가하면서 증가하였으나 보염기가 설치 후에는 공연비 5.2 이상에서는 감소하였고, 보염기의 직경이 커질수록 NO_x의 양은 더욱 감소하였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 연구(보조)비 (4년과제)의 지원으로 이루어졌음.

참고문헌

1. M. Nakayama, 1986, "Study of Uniform-size Liquid Droplet Formation by Ultrasonic Vibration", JSME(B), 52, 428.
2. Mao, C. P., 1987, "Distribution and Air Velocity Measurements in Air Assist Swirl Atomizer Sprays", Journal of Fluids Engineering, Vol. 109, pp. 64~69.
3. Mao, C. P., 1991, "Effect of Air Swirlers on Atomization and Spray Flame Stability", International Conference on Liquid Atomization and Spray System, pp.513~520.
4. Kilik, E., 1976, "The Influence of Swirler Design Parameters on the Aerodynamics of the Downstream Recirculation region", PH.D. thesis, Cranfield Institute of Technology, England.
5. Hebrard, P., Trichet, P., and Barday, X., 1991, "Experimental Investigation of Two-Phase Flow in the Near of an Airblast Atomizer", ICLASS-91.
6. 강완봉, 김덕줄, 2000, "선회각도 변화에 따른 2유체 선회분무의 거동특성", 대한기계학회 춘계학술대회논문집B, pp.943~948.
7. Dwer, H.A. and Sanders, B. R., 1986, "A Detailed Study of Burning Fuel Droplets," Twenty - First Symposium (International) on Combustion Institute, pp.633 ~ 639.
8. Presser, C., Guta, A. K., Avedisian, C. T. and Semerjian, H. G., 1990, "Fuel Property Effect on the Spray Flames," Twenty - Third Symposium (International) on Combustion Institute, pp.1361 ~ 1367.
9. Onuma, Y. and Ogasawara, M., 1975, "Studies on the Structure of a Spray Combustion Flame," Fifteen Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, pp.453 ~ 465.
10. Chiu, H. H., and Liu, T. M., 1977, "Group Combustion of Liquid Droplets," Combustion Science and Technology, Vol.17, pp.127 ~ 142.
11. Chigier, N., 1983, "Group Combustion Models and Laser Diagnostic Methods in Sprays : A Reviews," Combustion and Flame, Vol.51, pp.127~139.
12. J.SenDa and M. Kobayashi, S. Iwashita, H.Fusimoto, 1994, "Modeling of Diesel Spray Impingement on a Flat Wall," SEA 941894.
13. D.M.Wang and A.P. Watkins, 1993, "Numerical Modeling of Diesel Spray Wall Implication Phenomena", Int.J.Heat and Fluid Flow, Vol.14, No.3.
14. K. Ito, N. Matsumono, M. Kaji and M. Koyama, "Stabilization Mechanism of Turbulent Wake flame behind Bluff Bodies with Fuel Injection", Bulletin of JSME, Vol.27, No.234,1984, pp.2826~2832.