

보염기 형상에 따른 연료액적분포와 연소특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Drop Distribution and the Combustion Characteristics with different Bluff-body Geometries

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 geometry of the bluff-body influenced the spray shape and the combustion characteristics. Diameters of the bluff-body in this experiment are 6, 8, and 10 mm and the impingement angles (Θ) are 30°, 60°, and 90°. The measurement points were at the distances of 20 and 30 mm axially from the nozzle. The SMD and Rosin-Rammler distribution was acquired by image processing technique (PMAS), and the mean temperatures were measured by thermocouple. The results obtained are as follows; In the condition of $\Theta = 60^\circ$, the values of SMD are not greatly varied compared to the other conditions. As the impingement angle of bluff-body was increased, the high temperature region was wider along radial direction. When the air-fuel ratio was increased, the CO concentration was decreased.

주요기술용어 : Bluff-body(보염기), Impingement angle(충돌각), SMD(샤우타평균직경),
PMAS (입자운동해석장치), Schlieren photography(슈리렌사진).

1. 서론

액체연료는 동력이나 에너지를 얻기 위해서 연소과정을 거치게 되고 일부를 제외하고는 액상반응이 아닌 증발 후 연료 증기가 산소와 반응하여 연소한다.

연소형태는 휘발성에 따라 다르며 가솔린과 같은 휘발성이 높은 연료는 증발부와 연소부

로 분리하여 기체연료와 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 공해 물질인 CO, SOx, NOx, soot 등이 많다는 것이다.

액체연료를 미립화하여 연소시키는 방식은 공업용로, 디젤기관, 가스터빈엔진 등의 연소 장치에서 매우 중요하며 여러 기기에 있어서 그 비중이 점차 높아지고 있는 추세이다. 이러한 분무연소의 기본과정은 단위 질량당의 표

* 부산대학교 기계기술연구소

** 정희원, 부산대학교 기계공학부

면적을 증가시킴으로서 연소 기간 동안에 열과 물질 전달이 원활히 이루어질 수 있도록 미세한 작은 액적으로 액체 연료를 미립화시키는 것이다.

미립화 방법으로는 초음파를 이용한 방법⁽¹⁾과 2유체노즐을 이용한 방법 등이 있고, 2유체 분사 노즐은 기체의 속도가 낮은 영역에서는 미립화 특성과 연료의 분산분포의 특성이 나빠지는 단점을 가지고 있으며 공기 또는 액체 연료를 선회시켜 2유체의 상호충돌과 파동효과를 증대시킴으로서 양호한 미립화를 얻을 수 있다.

지금까지 분무연소는 이론⁽²⁾과 실험⁽³⁾ 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 구조가 가스 확산화염의 구조와 유사함이 밝혀졌고⁽⁴⁾, 1990년대 이후로 양호한 미립화를 얻기 위해 Diesel 충돌분무에 관한 연구가 이루어졌고⁽⁵⁾, 증질유에 물을 혼합한 유화연료에 관한 연구도 지속적으로 수행되고 있다⁽⁶⁾.

연소과정에 있어서 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 동반하는 것이 필수적이며 Bluff-body를 설치하는 것이 한 방법이다.

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

본 연구에서는 Bluff-body의 형상을 변화시

켜 분사된 액체연료의 축방향속도와 SMD를 측정하고 또한 연소시의 화염의 가시화와 온도 및 배출물의 특성을 연구 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1과 Fig. 2는 본 연구에 사용된 Bluff-body와 노즐을 나타낸 것이며 Table 1은 Bluff-body의 세부사항이다. Bluff-body는 분무된 액적에 최대한의 영향을 주며 화염의 형상에 영향을 미치지 않는 높이인 원통관 상단을 기준으로 10 mm의 위치에 부착될 수 있게 하였다.

연소기는 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.

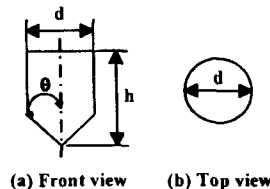


Fig. 1 Bluff-body

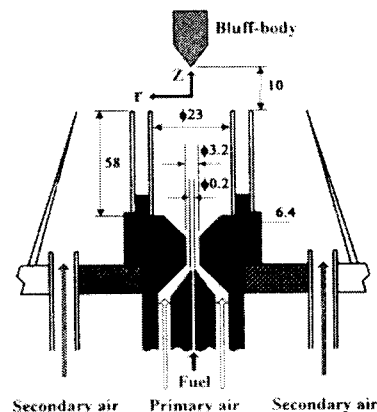


Fig. 2 Detail diagram of nozzle

Table 1 Dimension of bluff-body

Type	d/d _c (d _c =10mm)	Θ(°)	h(mm)
A	0.6	60	15
B	0.8	60	
C	1	60	
C-30	1	30	
C-90	1	90	

Fig. 3는 본 연구에 사용된 실험 장치 및 측정장치의 개략도이다. 자체 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 서지탱크를 설치하였으며 유량계에 의해 유량이 조절되어 연소기 내로 공급된다. 연료는 경유를 사용하였고 연료 탱크내부의 가압 된 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 측방향과 동축으로 분사되는 공기의 방향을 화염쪽으로 향하게 하였다.

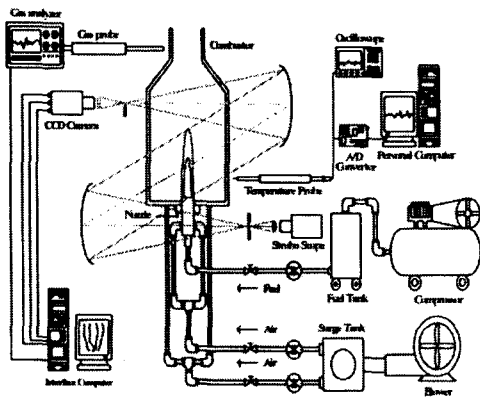


Fig. 3 Schematic diagram of experiment apparatus

2.2 실험방법

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 입경 뿐만 아니라 입자 직경의 분포를 구할 수 있다.

화염의 평균온도 측정은 직경 0.1 mm의 Pt/Pt-Rh 13%이 R-Type 수냉식 열전대를 사용하였으며, 노즐에 부착된 관의 상단을 기준으로 하여 측방향으로 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.

2.3 실험조건

연소기내에 공급되는 연료는 0.02 l/min으로 고정하고 1차 공기량은 Bluff-body가 설치되지 않은 상태에서 화염을 유지시킬 수 있는 최고 공기량이 42 l/min이었고 화염의 안정화를 위해 1차 공기량의 최대량(Qapmax)을 40 l/min으로 하였으며 각각의 양을 30 l/min, 35 l/min, 40 l/min으로 하였다. 2차 공기의 유량은 NOx의 대부분을 차지하는 Thermal NOx가 공기중의 질소 성분에 의한 것이므로 밀폐된 조건에서 화염을 안정화시킬 수 있는 최소량을 측정하여 2차 공기량으로 하였으며 그값은 80 l/min이고 연소실내에 일정하게 공급되도록 하였다.

Table 2 Experimental conditions

Nozzle type	Twin-fluid nozzle	
Working fluids	Air, Diesel oil	
Injection pressure (MPa)	0.2	
Flow rates	Fuel, Q _r (l/min)	0.02
	Primary air, Q _{ap} /Q _{apmax}	0.75, 0.88, 1
	Primary air, Q _{as} /Q _{apmax}	2

3. 실험결과 및 고찰

3.1 액적의 축방향 속도

Fig. 4는 열선유속계를 이용하여 1차 공기비가 $Q_{ap}/Q_{apmax} = 1$ 일 때 Bluff-body의 충돌각이 60° 이고 직경비 0.6, 0.8, 1인 경우의 축방향 평균 속도 분포이다. Bluff-body가 설치되지 않은 경우보다 설치된 후의 평균속도가 전반적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 Bluff-body의 설치로 인해 발생한 충돌류가 주류를 반경방향으로 밀어내어 축방향의 운동량이 반경방향 속도성분으로 전환된 것으로 사료된다. 그리고 평균속도 분포가 노즐의 중심부에서 반경방향으로 이동하면서 서서히 증가하다 $r = 5 \text{ mm}$ 부근에서부터 감소하는 포물선의 형태를 가졌다. 이것은 Bluff-body에 의해서 주류가 축방향으로 직접 진행하지 못하고 충돌류와 부딪힌 후 보임기 후류의 압력 저하로 인해 약한 공기의 유동장이 형성되었기 때문이다. 그리고 동일한 충돌각에서는 직경이 증가할수록 중심부의 속도는 더 감소하고 최고 평균유속의 변곡점은 반경방향으로 미세한 변화를 보였다.

Fig. 5는 Bluff-body의 직경비가 1로 일정하고 충돌각이 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 인 경우의 축방향 평균 속도 분포이다. Fig. 3에서처럼 보임기를 설치한 후의 평균 속도가 그렇지 않은 경우보다 전반적으로 감소한 경향을 나타내며, 동일한 직경에서는 충돌각이 증가할수록 중심부의 속도 감소 현상은 크게 나타나고 최고 평균 유속은 낮았으며 평균속도의 변곡점은

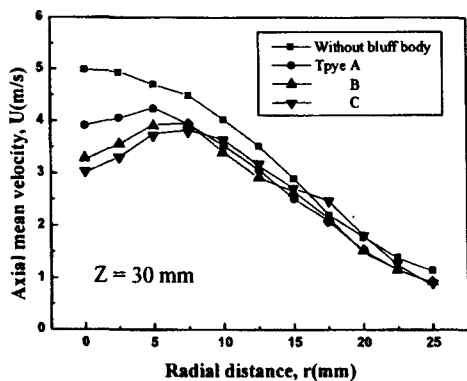


Fig. 4 Distribution of axial mean velocity for different diameters

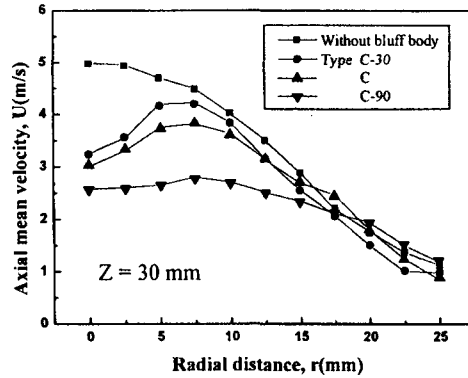


Fig. 5 Distribution of axial mean velocity for different angles ($Q_{ap}/Q_{apmax} = 1$)

반경방향으로 미세하게 변하는 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

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

Bluff-body 직경이 커질수록 SMD 값은 작아졌으며 반경방향으로는 거의 균일하게 변화했다. 이것은 Bluff-body에 의해 액적의 분사각이 넓어지게 되고 이것으로 인해 액적들이 균일

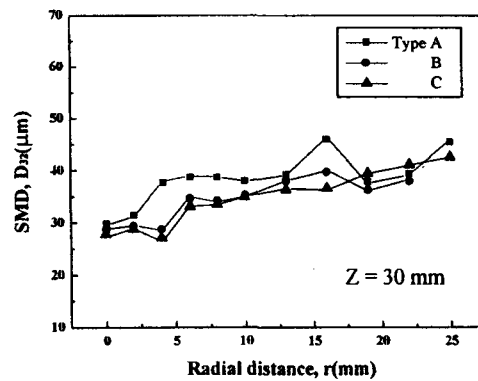


Fig. 6 Distribution of Sauter mean diameters ($Q_{ap}/Q_{apmax} = 1$)

하게 분포하였기 때문이라 사료된다.

Fig. 7의 $Z = 20$ mm에서 Bluff-body가 없는 경우와 상대적으로 충돌각이 완만한 $\Theta = 30^\circ$ 가 반경방향 10~20 mm사이에서 감소하다 증가하는 유사한 경향을 보였다. 그리고, Bluff-body가 없는 경우 반경방향 10 mm에서 최고 SMD값이 나타났으며 Bluff-body가 설치된 후에는 최대 값이 반경방향으로 이동하였고, $\Theta = 60^\circ$ 의 경우 반경방향으로 비교적 균일한 SMD분포를 보였다.

$Z = 30$ mm에서는 Bluff-body가 설치된 경우 중심부의 SMD가 낮게 나타났다. 이것은 Bluff-body에 의해서 형성된 보임기 후면의 재순환유동에 의해 작은 액적들은 재순환류 안으로 들어오지만 상대적으로 큰 액적들은 관성모멘트가 큰 이유로 재순환류의 궤도를 벗어나 하류로 흘러가기 때문으로 사료된다.

Fig. 8은 $d = 10$ mm, $\Theta = 60^\circ$ 의 Bluff-body를 이용해서 1차공기의 유량비를 달리한 경우의 SMD분포를 나타내었다.

$Z = 20$ mm에서 유량비 0.75의 경우 반경방향 6 mm에서 큰 값을 가졌다.

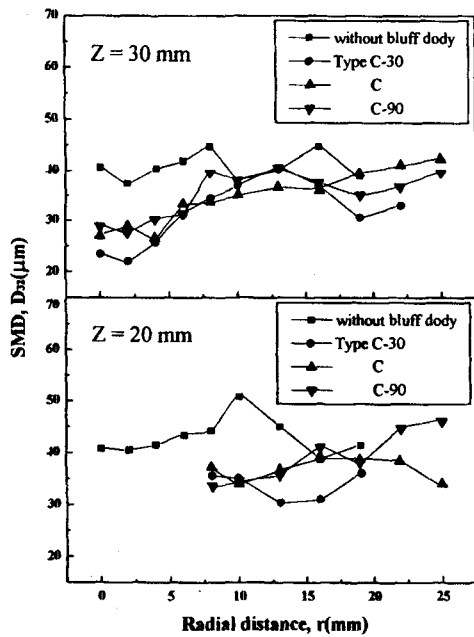


Fig. 7 Distribution of Sauter mean diameters ($Q_{ap}/Q_{apmax} = 1$)

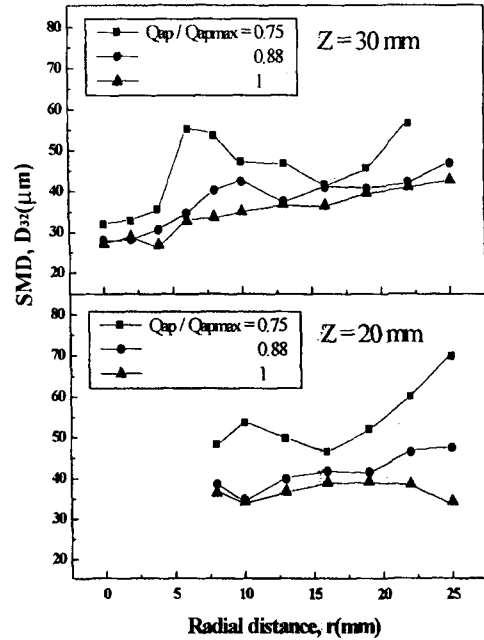


Fig. 8 Distribution of Sauter mean diameters, Type C

이것은 분사된 액적들이 Bluff-body 면을 부착 응집 된 후 Bluff-body 면에 액막이 형성되고 미립화 공기에 의해 2차 분열되었기 때문이다. 또한 다른 위치에 비해 큰 값을 가지게 단점이 있지만, 연소시에는 Bluff-body의 표면온도에 액적들은 증발하게되고 이 문제는 해결될 것이다. 유량비 0.88과 1을 비교하면 공기량이 많은 유량비 1에서 상대적으로 더 큰 충격에너지에 의해 반경방향속도분포가 증가하여 전체적으로 완만하게 증가하는 경향이 나타났다. 따라서 두 경우 모두 공기량이 많을수록 균일한 분포가 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 $Z = 30$ mm에서 측정된 액적들의 Rosin-Rammler 분포곡선이다.

Rosin-Rammler 분포함수⁽⁷⁾는 전체액적들의 총 체적에 대한 임의의 입경(x) 이하 액적들의 체적누적분률을 나타낸 것으로 식 (1)로 표현된다.

$$1 - Q = \exp[-(x/X)^q] \quad (1)$$

여기서, Q 는 체적누적분률, X 와 q 는 분포 변수이다.

Fig. 9에서 Type C와 Type C-60의 Rosin-Rammler 곡선은 횡축값 20과 종축값 40의 교차지점 오른쪽을 지나고 축방향 평균속도가 가장 낮게 나타나는 Type C-90은 외쪽으로 지나가며 기울기값은 다른 두 곡선에 비해 약간 큰 것을 알 수 있다. 이것은 노즐에서 분사된 주류가 상대적으로 Bluff-body에 의해 형성된 충돌류에 의해 축방향속도는 감소하고

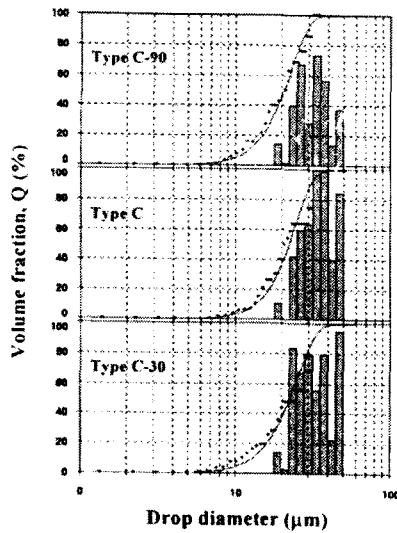


Fig. 9 Rosin-Rammler distribution
($Q_{ap}/Q_{apmax} = 1, r = 6 \text{ mm}$)

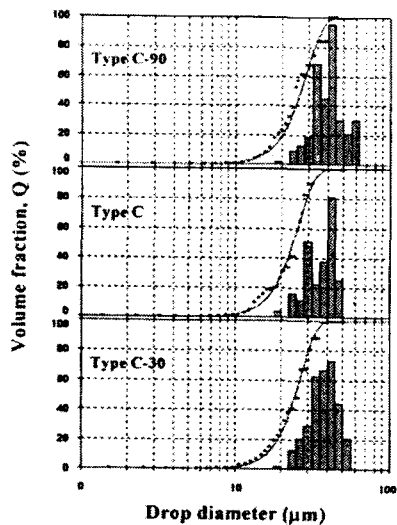


Fig. 10 Rosin-Rammler distribution
($Q_{ap}/Q_{apmax} = 1, r = 10 \text{ mm}$)

반경방향 속도성분이 증가된 유동장을 따라 대부분의 액적들과 SMD값이 큰 액적들이 흘러가게 되고 Bluff-body 후면에 형성된 순환류에는 적은 수의 작은 입자들이 유입되어졌기 때문에 사료된다. Fig. 10에서는 Type C가 가장 작은 직경값을 가지므로 다른 곡선에 비해 왼쪽으로 약간 이동하여 있는 것을 알 수 있고 액적들의 균일분포를 나타내는 기울기값이 가장 큰 값을 가지는 것으로 볼 때 Bluff-body 후면인 $Z = 30 \text{ mm}, r = 10 \text{ mm}$ 에서 Type C가 가장 양호한 미립화 특성을 가진다는 것을 알 수 있었다.

3.3 화염의 가시화

Fig. 11과 Fig. 12는 1차 공기량이 Q_{apmax} 일 때 각 Bluff-body에 의해 형성된 화염을 PMAS 장비의 광원과 50ns 이하의 짧은 광속으로 촬영할 수 있는 CCD카메라를 이용하여 반사경과 나이프에지 그리고 핀홀을 이용하여 촬영한 순간 슈리렌 사진이다.

Fig. 11에서 Bluff-body의 충돌각이 모두 60° 일 때 혼합기의 전단층이 Bluff-body의 직경이 클수록 반경방향으로 크게 형성되어 화염의 형상 역시 반경방향으로 넓어지게 되었으며, 이 영향은 SMD분포에서도 알 수 있었다.

Fig. 12에서는 Bluff body의 충돌각이 커지면 전단류층이 반경 방향으로 넓게 분포하고 있으며

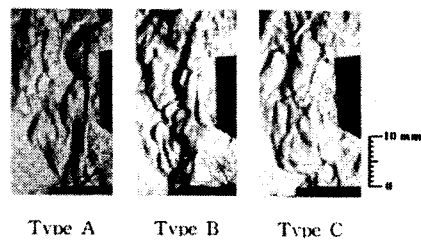


Fig. 11 Instantaneous schlieren photographs for different diameters

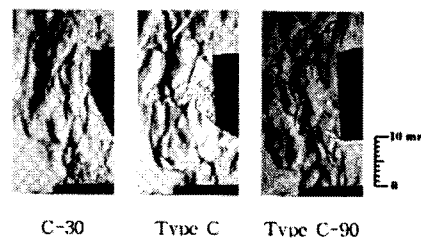


Fig. 12 Instantaneous schlieren photographs for different angles

Type C-30에는 Bluff body 후면에 약한 전단류층이 형성되어 있으며 Type C의 경우는 Bluff body 측면에서부터 후면까지 전단류층이 발달되어 있고 Type C-90에서는 전단류층이 다른 Bluff body 보다 훨씬 넓게 분포되었으며 Bluff body 후면까지 발달해 있는 것을 알 수 있으며 평균온도 분포에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

3.4 온도분포

내부혼합형 2유체 분사 노즐에 의하여 형성된 분무 화염은 분무 경계의 내측에 주화염이 형성되고 주화염의 내부는 액적과 증발된 연료 증기가 공존하는 영역으로서 연료 증기가 과농하여 산소가 부족하고 액적에 의한 냉각 등으로 인하여 연료 증기의 일부는 soot로 된다. 본 실험에서 사용한 Bluff body는 주화염 내부의 연료증기 과농과 soot 등의 문제들을 해결 할 수 있으며 열전대를 이용한 Bluff body 주위의 평균온도 분포를 통해 확인 할 수 있었다.

Fig. 13과 Fig. 14는 공기유량, Bluff-body 직경, Bluff-body 층돌각 변화에 따른 반경방향 온도분포를 나타낸 것으로 두 그래프 모두 Bluff-body의 각이 커질수록 반경방향으로 고온 영역이 넓게 분포하는 것을 알 수 있으며 이것은 Bluff-body에 의해서 연료액적 주류의 반경방향 이동에 따른 액적의 수밀도 증가로 인한 온도분포로 사료된다.

Fig. 14의 $Z = 30\text{mm}$ 에서 Type C와 C-30이 Bluff body가 없는 경우 비해 노즐 중심부의 평균온도는 낮고 반경방향으로 이동하면서 높은 값을 가졌으며 이것으로 볼 때 Bluff-body의

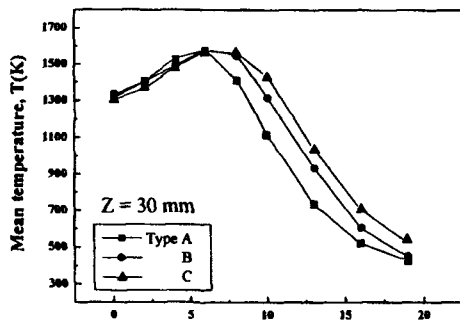


Fig. 13 Radial distribution of mean temperature for spray flame ($Q_{ap}/Q_{apmax} = 1$)

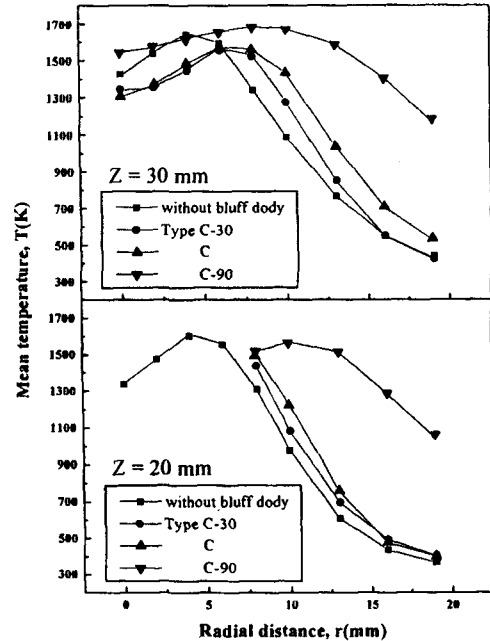


Fig. 14 Radial distribution of mean Temperature for spray flame ($Q_{ap}/Q_{apmax} = 1$)

설치가 2유체노즐의 주화염 내부의 연료과농 문제를 해결한 것으로 사료되며 최고 온도값은 거의 동일하지만 고온영역의 분포가 직경이 클수록 반경방향으로 이동하였다. Type C-90은 노즐 중심부에서 가장 온도가 높게 나타났다으며 이를 통해 Fig. 11의 슈리렌 사진에서 전단류층이 Bluff body 후면까지 성장한 것을 한번 더 확인 할 수 있었다.

3.4 배출물 특성

Fig. 15는 본 실험 장치에서 발생한 CO의 양을 배기가스 분석장치를 이용하여 측정된 값으로 CO의 발생원인이 연료와 공기의 혼합 불량과 2000K 이상의 고온에서 열해리에 의한 것으로 볼 때 본 실험에서는 최고 온도점이 1800K 이하로 2000K 이상의 고온영역은 존재하지 않다. 따라서 다량의 CO의 생성이 열해리에 의한 것보다 혼합상태와 관련되어 발생한 것으로 사료되며 본 실험에서는 Bluff-body가 부착된 경우 70~80%정도 CO의 양이 감소하였는데 이것은 Bluff-body의 부착으로 인해 Fig. 7과 Fig. 14에서 알 수 있듯이 액적들의 SMD 값이 감소하였고 이것으로 인해 연료와 공기의 혼합상태가 양호해졌기 때문이라 판단

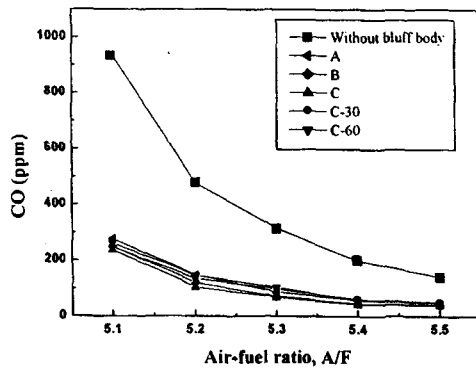


Fig. 15 Distribution of CO concentration for different diameters and angles

되며 Bluff body 형상에 관계없이 설치만으로도 유해 배출물인 CO저감에 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 사료됩니다.

4. 결론

Bluff-body를 이용하여 분사된 액체연료의 재순환 영역, 화염의 안정화 및 연소효율을 높이기 위한 본 실험에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 비연소시에 Type C가 축방향 $Z = 20$ mm와 $Z = 30$ mm에서 반경방향으로 균일한 SMD 분포를 나타내었다.
2. $\Theta = 60^\circ$ 일 때 Bluff-body의 직경비가 커질수록 액적들이 균일하게 분포하고 SMD값은 감소하게 되며 화염의 최고 온도값은 반경방향으로 이동하였다.
3. Type C가 Rosin-Rammler 분포곡선에서 기울기가 크고 균일한 액적직경 분포를 보였다.
4. 연소시 검출된 CO의 양은 Bluff-body를 설치하였을 경우 모든 Type에서 70~80 %감소하였다.

참고문헌

1. M. Nakayama, 1986, "Study of Uniform-size Liquid Droplet Formation by Ultrasonic Vibration", JSME(B), 52, 428.
2. 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.

3. Presser, C., Gupta, 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.
4. Onuma, Y. and Ogasawara, M., 1975,3 "Studies on the Structure of a Spray Combustion Flame," *Fifteen Symposium(International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, pp.453 ~ 465
5. J. Senda and M. Kobayashi, S. Iwashita, H.Fusimoto, 1994, "Modeling of Diesel Spray Impingement on a Flat Wall," SEA 941894.
6. Yong Il Lee, 2002, "An Evaluation on the Combustion Characteristics of Heavy Oil-Water emulsions," *Transactions of the KSME, B*, Vol. 26, No. 12, pp.1722 ~ 1728
7. H. Lefevre, 1989, "Atomization and sprays", Hemisphere Pub. Co.