

Bluff-Body형상이 연료액적크기와 화염온도에 미치는 영향

황상호* · 차건종** · 김덕줄***

The Effect of Bluff-Body Shapes on the Drop Size and Flame Temperature

Sang-Hon Hwang*, Keun-Jong Cha** and Duck-Jool Kim***

Key Words: Spray Combustion (분무 연소), Twin-fluid Atomizer (2유체 노즐), SMD(샤우타 평균 직경), NOx (질소산화물), Bluff-Body (보염기), PMAS (입자운동해서장치)

Abstract

The characteristics of spray combustion and drop size of spray through twin-fluid atomizer was experimentally investigated. The distribution of flame temperature have an effect on the generation of NOx. To investigate there effects, flame temperature with different spray shape was observed. The spray shape was varied by various bluff-bodys. Mean temperature were measured by thermocouple respectively, and NOx concentration was measure by NOx analyser. Distribution of droplet sizes were measured by PMAS. The result showed that the flame with wide distribution has lower temperature and lower NOx emission compared with narrow.

1. 서론

최근 들어 환경문제의 심각성으로 인해 유해 배출물 생성에 대한 관심이 증가하고 있고 특히 NOx와 CO2는 인체와 동식물에 유해하고 지구 온난화 현상을 유발시킨다. 따라서 연소 효율을 향상시켜 연료의 경제적 사용과 지구 온난화 방지를 위해서 분무 화염의 구조 및 특성을 명확히 파악해야 한다.

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

연소 형태는 휘발성에 따라 다르며 가솔린과 같은 휘발성이 높은 것은 증발부와 연소부로 분

리하여 기체 연료와 유사하게 연소하고 증유와 같은 휘발성이 낮은 연료는 액상에서 열분해가 일어나 잔탄이 연소한다.

지금까지 분무 연소는 이론⁽¹⁾과 실험⁽²⁾ 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⁽³⁾⁻⁽⁵⁾가 가스 확산 화염의 구조와 유사함을 밝혔고 1990년대 이후로 양호한 미립화를 얻기 위해 Diesel 충돌 분무에 관한 연구⁽⁶⁾⁽⁷⁾가 이루어졌다.

세계적으로 에너지 수요가 급증하고 있으며 이로 인해 자동차, 항공기, 보일러 등과 같은 열기관에 대하여 고부하 연소와 더불어 소형화 경량화가 요구되고 고부하 연소를 위해서는 연소속도를 증가시켜야 하기 때문에 강한 난류유동을 등

* 부산대학교 대학원
** 부산대학교 기계기술연구소
*** 부산대학교 기계공학부

반하는 것이 필수적이며 보염기를 설치하는 것이 한 방법이다.⁽⁸⁾

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.

따라서, 분무 특성이 화염에 지배적인 영향을 미치므로 본 연구에서는 2유체 노즐을 이용하여 보염기 형상에 따른 비연소시의 SMD 변화와 연소시의 평균온도 분포를 조사하여 분무화염이 이용되는 산업용 연소로, 가정용 난방기 등과 같은 연소기의 설계에 기초 자료를 제공함을 목적으로 한다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 노즐과 보염기의 개략도이다.

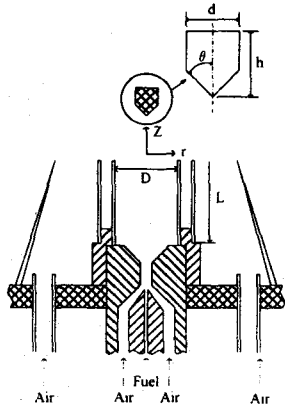


Fig. 1 Experimental of nozzle and bluff-body

1차 미립화용 공기가 내부에서 연료와 혼합되어 분사되는 내부혼합형 2유체노즐이다. 2차 공기는 연소에 필요한 공기로서 노즐 주위에 4개의 구멍을 통해서 공급되고 분사 속도를 줄이고 적은 양으로 화염을 안정화시키기 위해 원뿔형 관을 이용하여 축방향과 동축으로 분사되는 공기를 화염 쪽으로 향하게 하였다. 노즐상부에는 각각 직경(D)이 23 mm와 32 mm, 두께가 1 mm, 길이(L)가 57.5 mm 인 원통관을 2중으로 설치하였으며 직경이 작은 관은 연소시에 가열되어서 분사되는

연료의 증발을 빠르게 하며 화염을 안정화시키고 직경이 큰 관은 2차 공기의 유입으로 인해서 가열된 작은 관의 온도 저하를 막기 위한 것이다. 보염기는 분무된 액적에 최대한의 영향을 주며 화염의 형상에 영향을 미치지 않는 높이인 원통관 상단을 기준으로 5 mm의 위치에 부착될 수 있게 하였다.

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

Table 1 Dimension of bluff body

Type	d(mm)	θ (°)
A	6	30
B	6	60
C	8	30
D	8	60

Fig. 2는 본 연구에 사용된 실험 장치 및 측정 장치의 개략도이다.

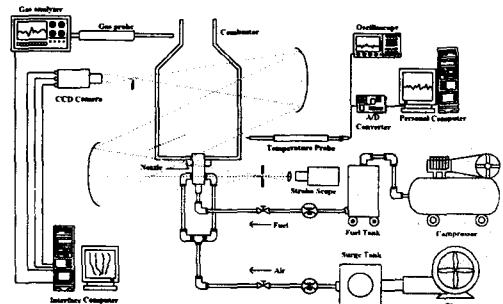


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

연소기는 외부공기의 유입을 막기 위해서 4각의 밀폐형(300 mm×300 mm×360 mm)으로 제작하였으며 연소기내의 화염거동을 직접적으로 관찰하기 위한 가시창으로 두께 10 mm, 15 mm×30 mm의 열처리된 강화유리를 마주보는 두면에 설치하였다. 압축기에서 발생한 공기는 압력조절기에 의해서 0.2 MPa로 조절되어 연료의 가압과 1차 미립화용 공기로 사용된다. 2차 공기는 송풍기에서 생성되고 이때 발생하는 압력 맥동을 줄

이기 위해 서지탱크를 지나 유량계에 의해서 유량이 조절되어 연소기 내로 공급된다. 연료는 경유를 사용하였고 연료 탱크내부의 가압된 공기에 의해서 노즐을 통해 분사된다.

화염의 평균온도 측정은 직경 0.1 mm의 Pt/Pt-Rh 13%이 R-Type 수냉식 열전대를 사용하였으며, 노즐에 부착된 판의 상단을 기준으로 하여 축방향으로 30 mm, 100 mm, 180 mm의 위치에 연소기 한쪽면에 구멍을 내어 열전대를 삽입하였고 반경 방향으로는 3 mm간격으로 평균온도를 측정하였다. 열전대에 의해서 검출된 기전력은 오실로스코프를 통해 확인한 후 A/D 변환기를 통해 컴퓨터에서 오프라인 프로그램을 통해서 시간 평균 온도를 구하였다. 이때, 복사와 전도에 의한 손실은 고려하지 않았다.

Fig. 3은 분무 입자의 계측에 사용한 입자분석 시스템으로 영상 처리에 의한 입자 계측 방법의 일종이다. 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.

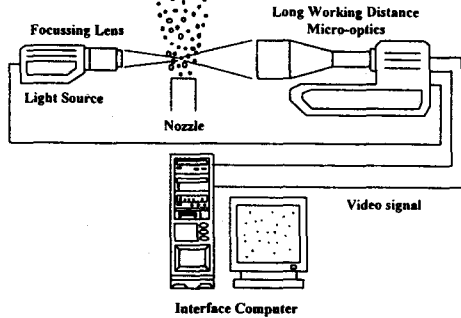


Fig. 3 Schematic diagram of droplet analysis system

2.2 실험 조건

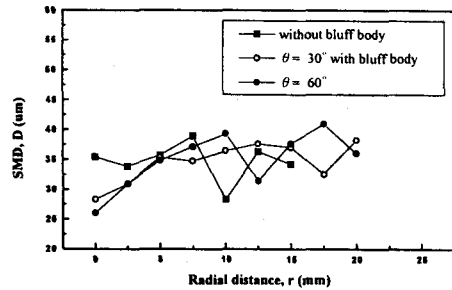
연소기내에 공급되는 연료는 20 cc/min으로 고정하고 1차 공기량은 보염기가 설치되지 않은 상태에서 화염을 유지시킬 수 있는 최고 공기량이 42 l/min이었고 화염의 안정화를 위해서 40 l/min으로 연료와 함께 연소실내로 분사되며, 2차 공기의 유량은 NOx의 대부분을 차지하는 Thermal NOx가 공기중의 질소 성분에 의한 것이므로 밀폐된 조건에서 화염을 안정화시킬 수 있는 최소량을 측정하여 2차공기량으로 하였으며 측정량은 80 l/min으로 연소실내에 일정하게 공급되도록

하였다.

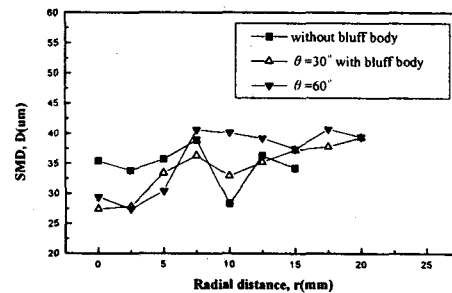
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 액적의 SMD 분포

다음은 연료가 20 cc/min이고 1차 공기가 40 l/min, 2차 공기가 80 l/min으로 분사되는 상태에서의 SMD(Sauter mean diameter)분포를 나타내고 있다.



(a) d = 6 mm



(b) d = 8 mm

Fig. 4 Distribution of Sauter mean diameters of nonburning spray at Z = 30 mm

Fig. 4 (b)에서 보염기가 설치된 상태에서 반경방향(r) 7.5 mm ~ 10 mm부근에서 액적의 직경이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 노즐에서 분사된 주류와 보염기에 의한 충돌류 사이의 재결합으로 인해 증가하는 것으로 보여지며, d = 6 mm보다 충돌류의 양이 많은 d = 8 mm에서 중심부분의 SMD 분포선의 증가 기울기가 큰 것을 알 수 있다. 중심부에서 SMD가 상대적으로 낮은 액적들이 보염기에 의해서 형성된 재순환 현상으

로 생각되는 영향에 의해 중심부로 유입되고 SMD가 큰 액적들은 관성모멘트가 큰 이유로 재순환류의 궤도를 벗어나게 된다.

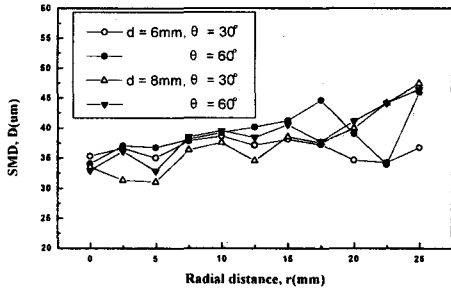


Fig. 5 Distribution of Sauter mean diameters of nonburning spray at Z = 60 mm

Fig. 5에서 d = 6 mm의 SMD 분포는 반경방향으로 균일한 분포를 보이며, d = 8 mm에서는 큰 보염기의 영향으로 인해 SMD의 변동이 상대적으로 많이 나타나고 있다.

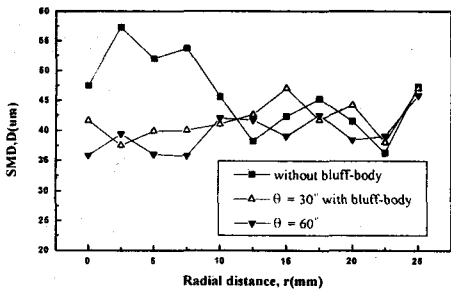


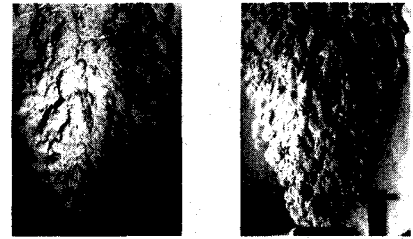
Fig. 6 Distribution of Sauter mean diameters of nonburning spray at Z = 100 mm

Fig. 6에서 d = 8 mm에서는 반경방향으로 거의 균일한 SMD 분포이루고 있지만 보염기가 없는 조건에서는 중심부에서 큰 SMD의 증가가 일어나는 것을 알 수 있다.

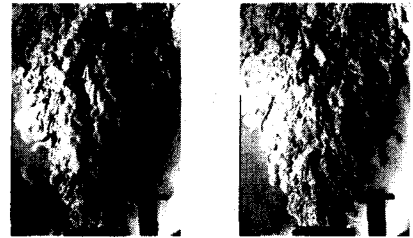
3.2 화염의 가시화

Fig. 7은 각 보염기에 대한 화염의 순간 슈리렌 사진을 나타낸 것이다. 보염기가 없는 (a)의 경우가 가장 화염의 폭이 좁게 분포되어있으며 (b-2)

에서 처럼 각도가 증가할수록 또 직경이 커질수록 화염의 폭이 증가하는 것과 작은 스케일의 와가 화염을 지배하는 것을 알 수 있다.



(a) without bluff body (b-1) with bluff body



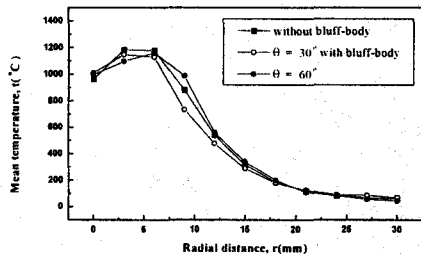
d = 6mm, θ = 30° d = 6mm, θ = 60°
(b-2) with bluff body

Fig. 7 Instantaneous schlieren photographs

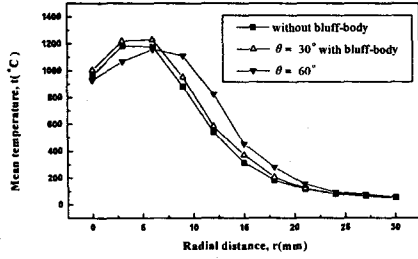
3.3 온도 분포

Fig. 8은 Z = 30 mm에서의 각 보염기 형상에 대한 평균온도 분포를 나타낸 것이며 Fig. 9는 Z = 100 mm, Fig. 10은 Z = 180 mm에서의 시간 평균온도이다.

Fig. 8에서 (a) 경우는 보염기가 없는 상태의 화염과 비슷한 온도분포를 가지며 (b) 경우는 θ = 30°의 각을 가진 것이 보염기가 없는 경우와 반경 방향의 온도 분포는 비슷하나 조금 높은



(a) d = 6 mm

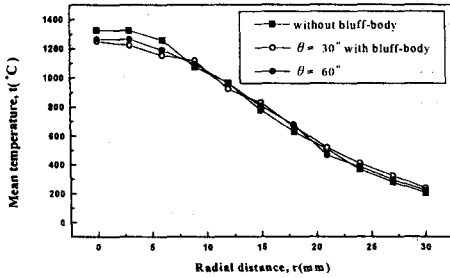


(b) $d = 8 \text{ mm}$

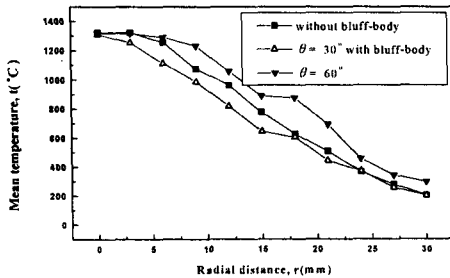
Fig. 8 Radial distribution of mean temperature for spray flame at $Z = 30 \text{ mm}$

온도값을 가지며, $\theta = 60^\circ$ 는 반경 방향으로 고온 영역이 넓게 분포되었고 다른 화염에 비해 최고점이 반경방향으로 향해있었다.

Fig. 9에서 (a)는 보염기가 없는 경우와 $d = 6 \text{ mm}$ 의 경우가 거의 일치하는 온도분포를 나타내었고 (b)의 경우는 각이 큰 $\theta = 60^\circ$ 가 고온 영역이 넓게 분포하는 반면, $\theta = 30^\circ$ 는 오히려



(a) $d = 6 \text{ mm}$



(b) $d = 8 \text{ mm}$

Fig. 9 Radial distribution of mean temperature for spray flame at $Z = 100 \text{ mm}$

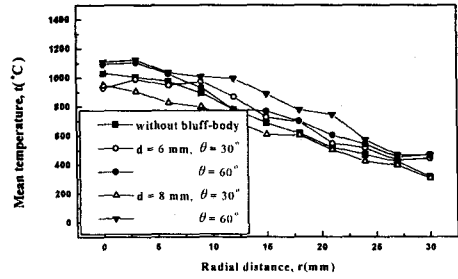


Fig. 10 Radial distribution of mean temperature for spray flame at $Z = 180 \text{ mm}$

낮아졌다.

Fig. 10은 $Z = 180 \text{ mm}$ 의 온도분포를 나타내는 것으로 화염의 끝부분에 해당하는 위치이다. 보염기의 각이 증가할수록 화염의 고온영역이 하류까지 길게 분포되어있으며 6 mm 보다 8 mm 쪽에서 고온영역이 높고 넓게 분포되어있다.

3.4 배출물 특성

각종 연료의 연소시에 발생하는 NO_x 는 반응된 질소의 기원에 따라서 Thermal NO_x , Prompt NO_x , Fuel NO_x 등으로 분류된다. 일반적으로 NO_x 의 대부분은 Thermal NO_x 이며 이것을 저감시키기 위해서는 연소기에 유입되는 공기량을 줄이든지 아니면 고온 영역의 발생을 억제시키면 된다. 따라서 본 실험에서는 2차 연소용 공기의 양을 밀폐시에 화염을 안정화시킬 수 있는 최소량으로 하였다.

Fig. 11과 Fig. 12에 보염기가 형상에 따른 NO_x

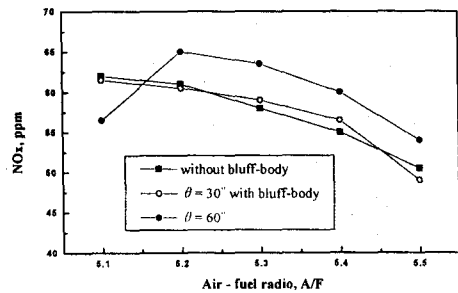


Fig. 11 Concentration of NO_x ($d = 6 \text{ mm}$)

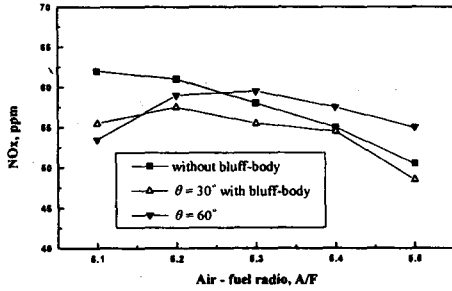


Fig. 12 Concentration of NOx(d = 8 mm)

배출량을 각각 나타내었다.

보염기가 없는 조건에서는 미립화용 공기량이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 보염기가 부착된 상태에서는 공연비(A/F)가 5.1인 경우를 제외하고는 충돌각(θ)이 작은 쪽이 NOx가 적게 측정되었다. 이것은 NOx의 대부분을 차지하는 Thermal NOx가 고온에서 많이 발생하므로 Fig. 7~9에서 알 수 있듯이 고온 영역이 적은 조건에서 NOx의 양이 낮게 측정되었다.

4. 결론

보염기 형상에 따른 액적의 크기와 화염의 온도분포를 조사한 결과는 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 비연소시 축방향으로 갈수록 액적의 SMD가 증가하는 경향을 보였다.

(2) 보염기를 설치하였을 때 SMD가 감소하였으며 보염기 직경이 클수록 중심부근에서 액적 크기가 증가되었다.

(3) 하류로 갈수록 보염기가 없는 경우 중심부의 SMD 분포가 보염기가 설치된 조건에 비해서 약 40%정도의 액적 증가가 있었다.

(4) 화염의 온도분포는 충돌각이 큰 것이 작은 것에 비해 축방향과 반경방향으로 고온 영역이 넓게 분포되었다.

(5) 보염기를 설치하였을 경우 상대적으로 온도가 낮은 $\theta = 30^\circ$ 에서 NOx의 배출량이 적었으며, $d = 8 \text{ mm}$ $\theta = 30^\circ$ 에서 가장 낮은 양이 검출되었다

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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
- (4) Chiu, H. H., and Liu, T. M., 1977, "Group Combustion of Liquid Droplets," Combustion Science and Technology, Vol.17, pp.127 ~ 142.
- (5) Chigier, N., 1983, "Group Combustion Models and Laser Diagnostic Methods in Sprays : A Reviews," Combustion and Flame, Vol.51, pp.127~139.
- (6) J.SenDa and M. Kobayashi, S. Iwashita, H.Fusimoto, 1994, "Modeling of Diesel Spray Impingement on a Flat Wall," SEA 941894.
- (7) 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.
- (8) 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.