

## 정적 예혼합 프로판 화염의 매연생성에 미치는 난류연소 영향에 관한 연구

배 명 환† · 안 수 환\*

(원고접수일 : 2003년 8월 18일, 심사완료일 : 2003년 10월 16일)

### **A Study on the Effect of Turbulent Combustion upon Soot Formation in Premixed Constant-Volume Propane Flames**

Myung-whan Bae† · Soo-Whan Ahn\*

**Key words** : Turbulent Combustion(난류연소), Soot Formation(매연생성), Premixed Constant-Volume Flame(예혼합 정적 화염), High Pressure and High Temperature(고압 및 고온), Laser Schlieren and Direct Flame Photographs(레이저 슈리렌 및 직접 화염 사진촬영), Laser Extinction Technique(레이저광 감쇠법)

#### **Abstract**

The soot yield is studied by a premixed propane-oxygen-inert gas combustion in a specially designed disk-type constant-volume combustion chamber to investigate the effect of turbulence on soot formation. Premixtures are simultaneously ignited by eight spark plugs located on the circumference of chamber at 45 degree intervals in order to observe the soot formation under high pressures and high temperatures. The eight flames converged compress the end gases to a high pressure. The laser schlieren and direct flame photographs for observation field with 10 mm in diameter are taken to examine into the behaviors of flame front and gas flow in laminar and turbulent combustion. The soot volume fraction in the chamber center during the final stage of combustion at the highest pressure is measured by the in situ laser extinction technique and simultaneously the corresponding burnt gas temperature by the two-color pyrometry method. It is found that the soot yield of turbulent combustion decreases in comparison with that of laminar combustion because the burnt gas temperature increases with the drop of heat loss.

#### 1. 서 론

연소기술의 발달에 따라 디젤기관, 가스터빈, 보

일러 등의 각종 연소시스템에서 배출되는 탄소상 미립자(이하 매연이라고 칭한다)의 농도는 대폭적으로 저하되고 있다. 따라서 지금까지 매연농도를

† 책임저자(경상대학교 기계항공공학부, 공학연구원) E-mail : mwbae@nongae.gsnu.ac.kr, T : 055)751-6071  
\* 경상대학교 기계항공공학부 E-mail : swahn@gaechuk.gsnu.ac.kr

측정하기 위해 사용되어 온 보쉬식 매연측정기에서는 최신의 연소시스템에서 배출되는 매연농도를 정확하게 측정할 수 없게 되어 보다 낮은 농도의 매연 배출물을 측정할 수 있는 장치가 필요하게 되었다.<sup>(1)</sup>

한편, 대기 중에 배출되는 매연의 미립자가 천식, 기관지염 등의 병을 유발시킨다는 의심이 있고, 그 미립자 중에 특히 입자 직경이  $2.5 \mu\text{m}$  이하인 초미립자(PM 2.5)에 의해 상기의 병을 일으킬 확률이 높다는 보고가 있다. 또한, PM 2.5 중에 직경이 100 nm 이하인 입자가 폐의 세포막을 투과하여 세포내에 축적됨으로써 폐암의 발병원인이 된다고 보고되고 있다.<sup>(2)</sup> PM 2.5는 대기오염 물질인 부유 입자상 물질(suspended particulate matter : SPM, PM 10 이하)보다 아주 작은 입자이다. SPM에는 비교적 입자가 큰 흙먼지 등의 자연물질도 포함되어 있지만, PM 2.5는 연소시스템에서 뿜어내는 배기 미립자 등의 화학물질이 주성분으로 알려져 있다. 따라서 이러한 연소시스템으로부터 배출되는 매연 배출물에 대한 저감대책이 강하게 요구되고 있다.<sup>(3)</sup>

매연 미립자의 핵생성, 성장 등에 관한 동역학적 연구는 현재 다각도로 진행되고 있는데, 생성과정에 관해서는 몇 개의 모델이 제안되고 있다. 이러한 매연생성에 관한 동역학적 모델을 이해할 수 있게 되면, 동시에 화염내의 유체역학적 및 열역학적 거동도 해석이 가능하게 되어 연소시스템에서 생성 및 배출되는 매연에 관한 제반 현상도 통일적으로 해석될 것으로 예상되나, 현상은 아직 그러한 단계에 도달하지 못하고 있기 때문에, 이론적인 연구접근과는 다르게 실험적으로 매연 미립자의 생성 조건, 생성량 등이 현상론적으로 조사되고 있다.<sup>(4)</sup>

매연의 생성조건과 생성량은 연료 종류, 당량비, 압력, 온도, 시간 등의 함수이고, 이러한 함수 관계를 대표적 화염이나 고온장에서 구하는 것은 실제의 연소 시스템에 대한 매연의 저감을 위한 대책을 세우는 데에 유용할 뿐만 아니라, 위의 동역학적인 연구를 위한 총체적인 자료를 제공한다고 하는 의미에서도 중요하다.<sup>(5)</sup>

본 연구에서는 연소시스템의 매연생성 과정을 설명하는 기초적 자료로서 사용하고, 현재 진행하

고 있는 매연농도 및 매연입경의 동시측정에 대한 기초연구로서 활용하기 위해 확산과정을 제외시켜 문제를 단순화한 예혼합기 연소의 매연생성 과정을 관찰하고, 고온·고압의 분위기하에서 매연농도를 측정할 수 있는 특수한 정적 연소기를 제작하여 이러한 연소기내의 프로판-산소-불활성가스 예혼합 화염에 있어서 매연생성량에 미치는 난류의 영향을 조사하는 것이 목적이다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서 제작한 정적 연소기<sup>(5)</sup>를 사용하여 매연생성의 투과광 감쇠와 연소가스온도의 2 파장에 대한 자발광 강도를 측정하였는데, 실험장치의 광학시스템 데이터 처리 계통도를 Fig. 1에 보여주고 있다. 광원으로는 He-Ne 레이저(파장 632.8 nm, 출력 1 mW)를 사용하였는데, 레이저의 투과광 강도와 매연으로부터의 자발광 강도를 분리하기 위하여, 브라그셀(Bragg cell)을 이용하여 주파수 1 kHz로 레이저 광속을 단속적으로 입사시켰다.

본 연구에서는 관찰영역에 대한 연소실 중심부근의 평균적인 매연농도의 변화를 측정하기 위하여 그림과 같은 광학시스템에 의해 레이저로부터의 광속을 확대해서 입사시켰다. 레이저 광속만을 직접 입사시키는 방법도 시도하여 보았지만, 양방법의 투과율 측정값이 거의 일치했기 때문에 확대

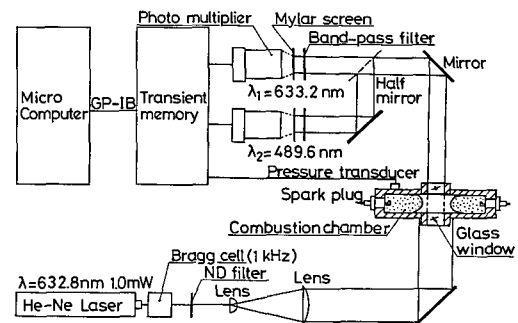


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental arrangement

대한 광속을 입사시켰다.

연소기는 부력의 영향을 적게 하기 위해 수평으로 설치했다. 브라그셀로부터 나온 광속이 직경 10 mm의 관측용 유리창에 충분히 들어 갈 수 있도록, 2 개의 볼록렌즈에 의해 직경 약 20 mm의 평행광속으로 확대하였는데, 확대된 광속은 반사경에서 직각으로 굴절되어 관찰용 유리창을 통과하여 연소실내를 지나간다. 연소실의 반대방향에 있는 반사경에서 다시 직각으로 굴절된 실효파장  $\lambda_1 = 633.2 \text{ nm}$ 의 투과광과 매연으로부터의  $\lambda_2 = 489.6 \text{ nm}$ 에 대한 자발광 강도가 간섭필터를 통과하고 마이러막(Mylar screen)에 닿은 후, 이들 강도를 광전자 증배관에 의해 각각 측정한다. 압력변환기 및 광전자 증배관의 출력은 웨이브 메모리(8 bits, 8192 words)와 디지털 스토리지 오실로스코프(8 bits, 4 kwords)에서 A/D 변환을 하고, 확인한 후에 마이크로 컴퓨터에 전송하여 압력, 연소가스온도, 매연체적농도 및 매연생성량을 산출했다.

2.2 측정방법

화염중에 불규칙적으로 부유하는 매연의 미립자군에 파장  $\lambda$ 의 광을 입사시킨 경우, 투과율  $\tau$ 와 매연체적농도  $f_v$ 의 관계는 Lambert-Beer의 법칙 및 Rayleigh의 식<sup>(4)</sup>에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = \exp[6\pi L/\lambda \cdot \text{Im} \{(m^2 - 1)/(m^2 + 2)\} \cdot f_v] \quad (1)$$

여기서 L은 광통과 길이이고, m은 매연의 복소굴절률인데, m은 Dalzell & Sarofim<sup>(6)</sup>의 값을 사용하였다.

본 연구에서는 충전 혼합기의 초기압력에 따라 혼합기에 포함되는 연료량이 다르기 때문에, 매연체적농도  $f_v$ 로서는 매연생성의 경향을 비교할 수가 없다. 따라서 공급된 연료중, 탄소의 몇 %가 매연으로 변환되었는가를 매연생성량  $C_s(\%)$ 로서 정의하여 매연생성의 경향을 평가하기로 한다.  $C_nH_{2n+2}$ 의 정파라핀계 연료를 사용한 경우의  $C_s$ 와  $f_v$ 의 관계는 다음과 같이 된다.<sup>(4)</sup>

$$C_s = \frac{7n+1}{6n} \cdot (1 + \frac{1}{\phi f_{st}}) \cdot (\frac{1}{1-DRm}) \cdot \frac{\rho_s}{\rho_{bg}} \cdot f_v \quad (2)$$

여기서 n은 연료분자중의 탄소원자수,  $\phi$ 는 혼합기의 당량비,  $f_{st}$ 는 이론 연료-산소비, DRm는 (불활성가스 질량)/(혼합기 질량),  $\rho_s$ 는 매연의 밀도 ( $1.8 \text{ g/cm}^3$ )<sup>(7)</sup>,  $\rho_{bg}$ 는 연소가스의 밀도를 나타낸다.

투과광 중에는 간섭필터를 통과하여 광전자 증배관에서 검출되는 레이저 파장에 해당하는 화염의 자발광이 포함되어 있다. 이 발광의 영향은 레이저광을 강하게 하면 상대적으로 작게 되지만, 본 연구에서는 연소가스온도를 측정하기 위하여 레이저광 강도를 비교적 약하게 하였기 때문에, 자발광을 무시할 수가 없다. 그림에서 투과광 강도에 비하여 자발광 강도도 상당히 큼을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 브라그셀을 이용해서 투과광 및 자발광 강도를 동시에 측정하여 자발광 강도를 뺀 투과광 감쇠법을 이용해서 매연농도를 측정했다.

매연 입자의 열복사에 주목하는 2색법에서는 화염중의 매연 입자온도를 측정하기 때문에, 매연 입자온도와 주위 연소가스온도와의 관계를 파악할 필요가 있다. 매연 입자의 표면반응이 없는 경우에는 매연 입자온도와 주위의 연소가스온도는 거의 같다고 보고되고 있는데, 표면반응이 있는 경우에도 매연 입자온도와 주위의 연소가스온도는 거의 일치한다고 보고되고 있다.<sup>(8-10)</sup>

다른 2 파장의 자발광 강도를 검출해서 연소가스온도를 구하는 2색법의 온도측정에는 크게 상대값 및 절대값 측정법의 두 가지 방법이 있는데, 본 연구에서는 상대값 측정법으로부터 변형시킨 개량 2색법을 사용하였다.<sup>(4,11)</sup> 2 파장에서 측정된 자발광 강도  $E_1, E_2$ 를 사용하는 연소가스온도의 식은 다음과 같다.

$$T_{bg} = \frac{C_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)}{\ln[\alpha_1/\alpha_2 \cdot \epsilon_1/\epsilon_2 \cdot E_2/E_1 \cdot (\lambda_2/\lambda_1)^5]} \quad (3)$$

여기서  $C_2$ 는 제 2복사 상수( $1.438 \text{ cm} \cdot \text{K}$ ),  $\lambda$ 는 실효파장,  $\alpha$ 는 장치상수,  $\epsilon$ 는 화염의 사출물이고, 하첨자 1, 2는 각각 실효파장  $\lambda_1, \lambda_2$ 의 값을 나타낸다. 장치상수  $\alpha$ 와 실효파장  $\lambda_1, \lambda_2$ 는 흑

체로를 이용하여 검정했다.<sup>[9]</sup>

Fig. 2에는 당량비  $\phi = 2.1$ , 초기압력  $P_1 = 0.89$  MPa, 불활성가스중의 아르곤 체적비율이 0.0인 경우의 측정 및 해석 결과를 보여주고 있다. 그림의 하단에는 출력된 투과광 및 자발광 강도의 생데이터를, 중단에는 생데이터로부터 계산된 압력  $P$ 와 매연체적농도  $f_v$ 를, 상단에는 연소가스 온도  $T_{bg}$ 를 나타내고 있다. 그림에서 압력이 최고값에 달하는 전후에서 매연생성이 일어나고 있음을 알 수 있다.

매연생성은 온도와 압력의 시간적 변화에 대한 영향을 받기 때문에, 그림으로부터 알 수 있는 것처럼, 본 실험에서는 매연생성중에 연소가스온도

$T_{bg}$ 도, 압력  $P$ 도 변화하고 있다. 따라서 본 연구에서는 매연체적농도  $f_v$ 의 값이 최종 매연체적농도  $f_v^*$ 의 1/2이 되는 시각의 압력과 온도를 매연생성시의 압력 및 온도에 대한 대표값으로 정하여 각각  $P^*$ ,  $T_{bg}^*$ 로 나타낸다. 여기서  $P^*$ 는 초기압력을 변화시킴에 의해 변화시킬 수 있다.  $T_{bg}^*$ 는 초기압력에 따라서도 당연히 변화하지만, 불활성가스중의 질소와 아르곤 체적비율을 바꾸면 변화시킬 수 있다. 매연생성량  $C_s^*$ 는 그림의  $f_v$ 의 최종값을 이용해서 산출했고,  $f_v$ 의 최종값은 연소가 종료되어 매연체적농도  $f_v$ 가 일정하게 된 후, 시간 50 ms 동안의 데이터를 평균해서 구했다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 난류 발생기

디젤기관 등의 연소시스템에 있어서 연소의 본질은 비정상 난류 확산연소이기 때문에, 실제 연소시스템에 대한 배기정화의 대책을 세우기 위해서는 난류연소에 의한 매연생성량을 조사하는 것이 필요하다. 또한 본 연구와 같은 정적 연소기를 사용하여 층류화염에 대한 연구를 수행하는 경우에는 연소실 벽면의 열손실에 의한 투과광 검출방향의 연소가스에 대한 온도분포의 영향이 염려된다. 따라서 이러한 두 가지 관점, 즉 디젤연소의 본질을 이해하기 위한 난류화염의 매연생성량과 매연생성량에 미치는 온도분포의 영향을 조사하기 위하여 난류연소의 실험을 하였다.

난류를 발생시키기 위하여 Fig. 3과 같이 높이가 연소기의 두께와 같은 다공의 난류발생원통을 제작하여 연소실내에 이러한 다공 원통의 중심을 연소기의 중심과 일치시켜 설치하였다. 8 개의 점화플러그에서 전파되어 온 층류화염은 다공 원통 내측을 통과할 때 난류화염으로 된다. 이렇게 하여 난류연소에 있어서의 매연생성을 조사했다.

난류화염을 만들기 위하여 Table 1에 표시한 5 종류의 난류발생원통형을 이용한 난류연소의 실험에 의해 압력, 매연체적농도 및 겉보기 매연생성기간을 조사했다. A형은 원통의 직경을 변화시킨 것이고, C, D, E형은 다공의 총면적비를 변화시킨

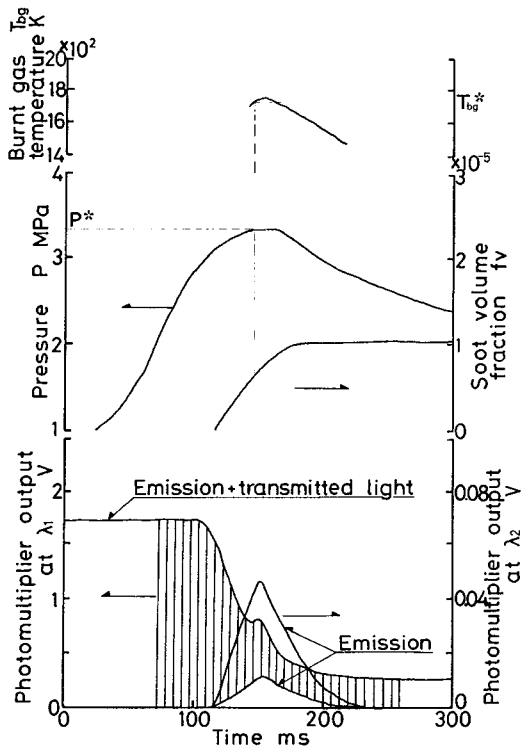


Fig. 2 Typical data of emissions, emitted + transmitted light, pressure  $P$ , soot volume fraction  $f_v$  and burnt gas temperature  $T_{bg}$  as a function of time. Conditions : laminar combustion, 8 points ignition, equivalence ratio  $\phi = 2.1$  and initial pressure  $P_1 = 0.89$  MPa

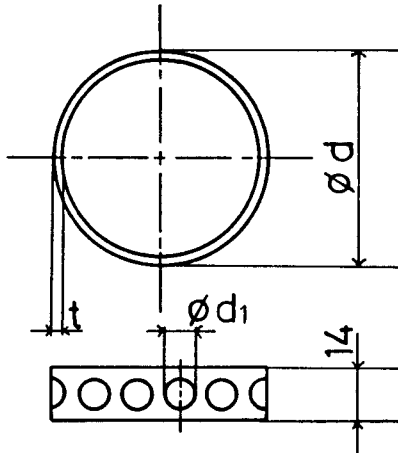


Fig. 3 Turbulence generating ring

Table 1 The types of turbulence generating ring

Type	Material	$d \times t$	$d_1 \times n$	Area Ratio(%)
A	Brass	19×0.5	4×9	13.5
B	Aluminum	50×0.2	6×12	16.7
C	Aluminum	50×2.0	4×53	30.3
D	Aluminum	50×2.0	4×27	15.4
E	Aluminum	50×2.0	4×18	10.3

$d$  = diameter of cylindrical ring  
 $t$  = thickness of cylindrical ring  
 $d_1$  = diameter of small hole  
 $n$  = number of small hole

The ratio of total hole area =  

$$\left[ \frac{(\pi d_1^2 / 4) \cdot n}{(14 \pi d)} \right] \cdot 100 (\%)$$

것이다. 또한, B형의 경우에는 다공의 직경을 변화시켜 본 것이다.

Fig. 4는 각각의 난류발생 원통형에 의해 난류연소를 시킨 경우의 압력과 매연체적농도의 시간변화를 나타내고 있다. 또한, 층류연소의 결과도 비교하기 위하여 그림에 나타내고 있다. 초기압력이 다르기 때문에, 단순하게 비교할 수는 없지만, B형과 D형의 경우에 가장 연소가 빨리 이루어지고 있는 것 같이 보인다.

Fig. 5에서는 당량비  $\phi = 2.2$ 와 초기압력  $P_i = 0.92$  MPa에서 난류발생 원통의 B형과 D형을 이용해서 난류연소를 시킨 경우의 압력과 매연체

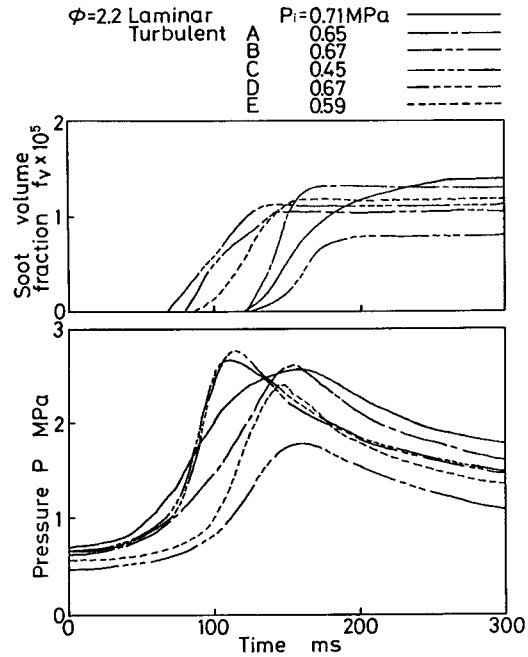


Fig. 4 The comparison of combustion characteristic between the various types of turbulence generating ring

적농도의 시간변화를 비교하고, 동시에 동조건의 층류연소의 경우도 비교하고 있다. Fig. 5에 의하면 난류발생 원통의 B형과 D형에서는 최고압력과 매연체적농도가 거의 같지만, D형의 결보기 매연

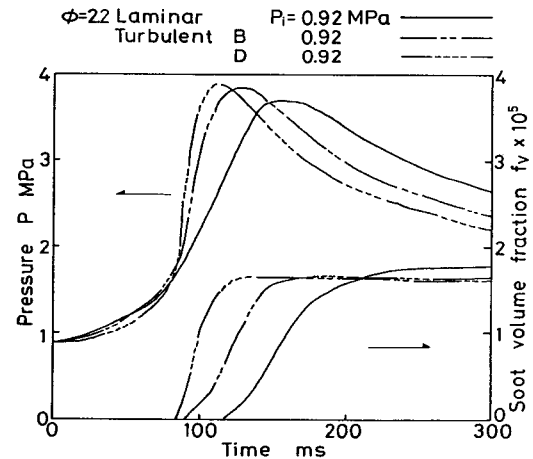


Fig. 5 The comparison of combustion characteristics between the type B and D of turbulence generating ring

생성기간이 약간 짧고, 난류에 의한 연소속도도 D형의 경우가 약간 빠르기 때문에, 최고압력까지의 시간도 짧아지고 있다. 따라서 본 연구에 대한 난류연소의 경우에는 직경 50 mm, 높이 14 mm, 두께 2 mm의 원통에 직경 4 mm의 구멍이 27개 뚫인 D형의 난류발생 원통(구멍의 총면적비 15.4%)을 사용하였다.

### 3.2 관찰영역의 연소가스 거동

연소실내의 연소가스 흐름에 의한 화염거동을 정성적으로 관찰하기 위하여 정적 연소기 중심부의 관찰영역에 대한 고속도 레이저 쉬리렌 및 직접 사진을 촬영했다. 레이저 쉬리렌 사진 촬영시에는 2개의 볼록렌즈에 의해 He-Ne 레이저(파장 632.8 nm, 출력 1 mW)광을 확대하여 연소기의 유리창을 통과시키고, 중심파장 635.1 nm의 간섭필터(FWHM 3 nm)를 통과한 후, 고속도 카메라(HYCAM II)에 들어오도록 광학시스템을 설치했다.

직접사진을 촬영할 경우에는 거울에 의해 화염으로부터의 자발광만이 통과되도록 설치했다. 고속도 카메라의 조건은 촬영속도가 매초 1000 및 2000 프레임, 셔터상수가 1/2.5, 조리개 3.5이다. 연소압력과 촬영사진을 시간적으로 대응시키기 위하여 마킹 제너레이터를 이용해서 타이밍 및 이벤트 마크가 표시되도록 간단한 회로를 제작하여 점화장치와 연결하였다.

매연이 생성되는 당량비의 분위기에서 연소가스 온도, 초기압력 등의 영향을 보기 위하여 Table 2에 같이 24 조건에서 사진을 촬영하였는데, 경우에 따라서 재현성을 조사하기 위하여 같은 조건에서 2~3회 촬영을 했다. 여기에서는 층류 및 난류 연소에 관해 대표적으로 당량비  $\phi = 2.2$ , 초

기압력  $P_i = 0.78 \sim 0.80$  MPa, 불활성가스중의 아르곤의 체적비율  $Ar/(N_2 + Ar) = 0.0$ 인 조건에 대한 레이저 쉬리렌 및 직접 사진의 촬영결과를 Fig. 6, 7, 8 및 9에 보여주고 있다.

2 종류의 고속도 사진으로부터 화염거동을 관찰해 보면 층류연소의 경우, 관찰영역에서의 화염은 연소가스와 미연가스를 분리하는 명확한 화염면이 보이고, 또한 화염면은 흐트러지지 않고 중심을 향해 화염이 전파되고 있다. 또한 여기에서는 제시하고 있지 않지만, 초기압력 및 불활성가스중 아르곤의 체적비율에 관계없이 화염면은 중심을 향해서 진행되고 있다. 즉, 층류연소에서는 불활성가스중 아르곤의 체적비율과 초기압력에 관계없이 측정위치의 가스는 거의 이동하지 않고 있음을 확인할 수 있다.

난류연소에서는 화염면이 보이는 경우도 있지만, 화염의 거동이 빠르고 난류가 발생되므로 층류에 비하여 명확하지가 않다. 또한, 관찰영역에서의 난류화염은 빠른 화염전파속도와 난류에 의해 화염면의 요철이 많아지고, 8개의 점화플러그에서 온 화염이 혼합되므로, 층류화염과 동일한 화염반경에 비하면, 난류화염의 내부에는 다량의 미연가스가 포함되어 있다.<sup>[12]</sup> 즉, 난류화염의 경우에는 연소실내의 가스가 상당히 많이 이동되고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 매연생성량 $C_s^*$ 에 미치는 압력과 온도의 영향

매연생성시의 압력  $P^*$ 이 증가할수록 초기 충전 혼합기의 밀도가 높기 때문에, 최종 매연체적농도  $f_v^*$ 의 값도 커진다. 따라서 Fig. 10에는 매연생성의 정량적인 고찰을 하기 위하여 당량비  $\phi = 2.1$ 일 경우, 압력  $P^*$ 에 대해 매연체적농도가 아닌 매연생성량  $C_s^*$ 를 사용하여 나타내고 있다. 여기서 L은 층류연소를, T는 난류연소를 나타낸다. 그림에서 당량비가 일정한 경우,  $C_s^*$ 는  $P^*$ 의 증가와 함께 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향은 정성적으로 정상 예혼합 화염<sup>[13, 14]</sup> 및 정적 예혼합화염<sup>[15]</sup>의 결과와 유사하게 나타나고 있다. 그러나 Fig. 10에는 압력의 영향과 동시에 온도의 영향도

**Table 2 Experimental conditions of combustion photography**

Initial Pressure	0.55 ~ 0.61 MPa, 0.78 ~ 0.80 MPa.
Ar/(Ar + N <sub>2</sub> )	0.0, 0.5, 1.0
Type of Combustion Flow	Laminar, Turbulent
Type of Photography	Laser Schlieren, Direct

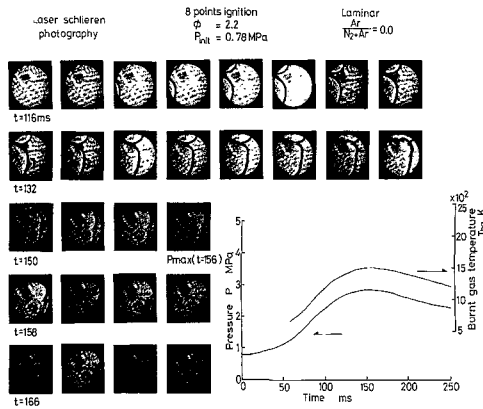


Fig. 6 High-speed laser schlieren photographs in observed region. Condition : laminar combustion, eight points ignition, equivalence ratio  $\phi = 2.2$ , initial pressure  $P_i = 0.78$  MPa and  $Ar/(Ar + N_2) = 0.0$

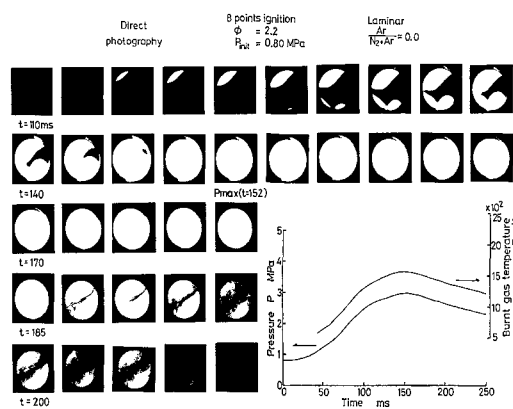


Fig. 7 Direct photographs in observed region. Condition : laminar combustion, eight points ignition, equivalence ratio  $\phi = 2.2$ , initial pressure  $P_i = 0.80$  MPa and  $Ar/(Ar+N_2)=0.0$

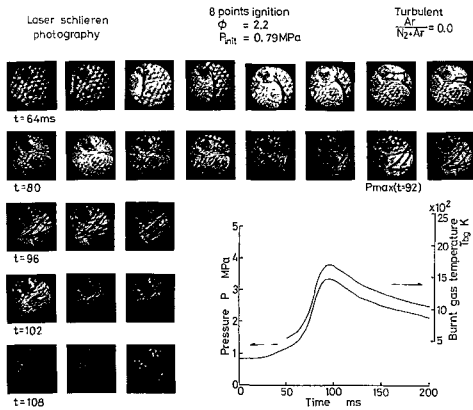


Fig. 8 High-speed laser schlieren photographs in observed region. Condition : turbulent combustion, eight points ignition, equivalence ratio  $\phi = 2.2$ , initial pressure  $P_i = 0.79$  MPa and  $Ar/(Ar + N_2) = 0.0$

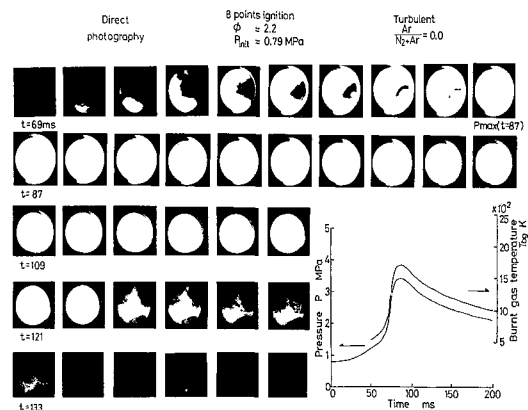


Fig. 9 Direct photographs in observed region. Condition : turbulent combustion, eight points ignition, equivalence ratio  $\phi = 2.2$ , initial pressure  $P_i = 0.79$  MPa and  $Ar/(Ar + N_2) = 0.0$

포함되어 있다고 생각되므로, Fig. 10의 각 데이터에 대응하는  $T_{bg}^*$ 와  $P^*$ 의 관계를 나타낸 것이 Fig. 11이다.

Fig. 11에 표시한 것처럼 압력이 높아질수록 연소가스 단위질량당에 대한 열손실의 비율이 줄어들기 때문에,  $T_{bg}^*$ 도 높아지고 있다. Fig. 10의 데이터에는 압력뿐만이 아니고, 온도의 영향도 포함되어 있으므로, 매연생성량  $C_s^*$ 에 미치는 온도의 영향을 조사하기 위해 일정한 당량비에서 예혼

합기중 불활성가스 ( $N_2 + Ar$ )의 체적비율을 고정하여 아르곤의 체적비율을 변화시켜 연소가스온도를 변화시키는 실험을 하였다.

$Ar/(N_2 + Ar) = 0.0$  및  $0.229$ 인 경우에 대한 데이터가 Fig. 10과 Fig. 11에 나타나 있는데, 아르곤의 체적비율을 증가시키면, 가스의 열용량이 저하하여  $T_{bg}^*$ 는 증가하고 있다. 그런데 아르곤의 체적비율을 증가시키면  $C_s^*$ 는 감소한다. 압력과 온도가  $C_s^*$ 에 미치는 영향을 분리하기 위하여,

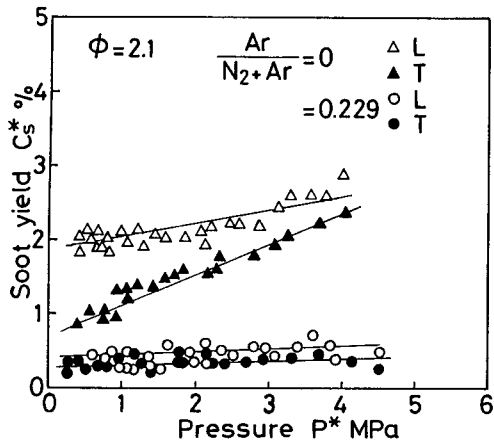


Fig. 10 Comparison of soot yield  $C_s^*$  versus pressure  $P^*$  between laminar and turbulent combustion at  $\phi = 2.1$

Fig. 10과 Fig. 11의 데이터를 가지고  $T_{bg}^*$ 를 파라미터로 한  $C_s^*$ 와  $P^*$ 의 관계를 다시 정리하면, Fig. 12와 같은 중요한 결과를 얻을 수 있다. Fig. 12에는 당량비  $\phi = 2.1$ 의 다른 데이터도

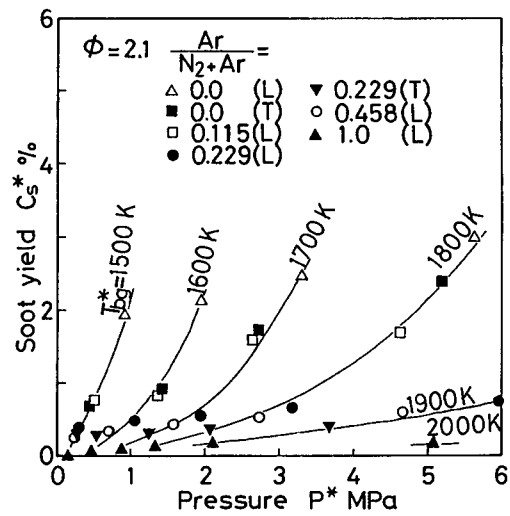


Fig. 12 Correlation between soot yield  $C_s^*$  and pressure  $P^*$  for laminar and turbulent combustion as a parameter of burnt gas temperature  $T_{bg}^*$  at  $\phi = 2.1$

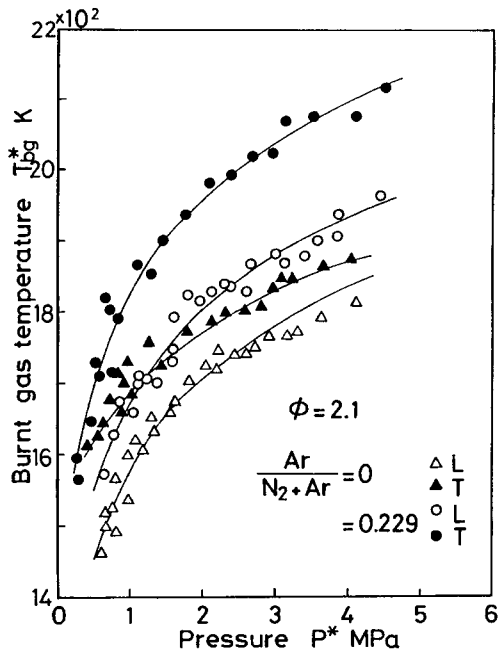


Fig. 11 Comparison of burnt gas temperature  $T_{bg}^*$  versus pressure  $P^*$  between laminar and turbulent combustion at  $\phi = 2.1$

포함되어 있는데, 그림에서 연소가스온도가 낮은 경우, 매연생성량은 압력의 상승과 함께 급격하게 증가하는 경향이 있지만, 온도가 높아짐에 따라 압력의 영향은 작아짐과 동시에 매연생성량이 감소함을 알 수 있다. 또한  $P^*$ 가 일정하면, 매연생성량  $C_s^*$ 는  $T_{bg}^*$ 의 증가에 따라 감소한다. 이러한 경향은 산소를 포함하지 않은 연료-불활성가스 혼합기를 이용한 충격파관의 실험에서 관찰되고 있는데, 그 이유로서는 고온이 될수록 열분해가 진행되어 열분해 생성물로부터의 매연의 생성반응이 늦어지기 때문이라고 설명되고 있다. 예혼합 화염의 실험에서는 연소가스온도의 상승에 따라  $O_2$ ,  $OH$  등에 의한 매연의 산화가 촉진되기 때문이라고 생각된다.<sup>[4, 16]</sup>

### 3.4 매연생성량 $C_s^*$ 에 미치는 난류연소의 영향

본 실험장치의 경우, 연소기 내벽부근에 대한 온도경계층내의 온도가 낮기 때문에, 매연농도가 높아지는 것이 아닌가 하는 우려가 있다. 그런데 난류연소의 경우에는 온도경계층의 두께가 얇아진다고 생각된다. 따라서 온도경계층이 매연생성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 난류연소에 있어



서 매연생성량을 측정하여 난류 및 층류 연소를 비교해 보았다.

당량비  $\phi = 2.1$ 에 있어서  $Ar/(N_2 + Ar) = 0.0$  및  $0.229$ 의 경우, 층류 및 난류 연소에 대해서 매연생성시의 압력  $P^*$ 와 매연생성량  $C_s^*$ 의 관계를 Fig. 10에, 이에 대응한  $P^*$ 와  $T_{bg}^*$ 의 관계를 Fig. 11에 보여주고 있다. 그림에서 난류연소에서 연소기간이 짧아진 만큼 연소가스온도  $T_{bg}^*$ 가 층류연소에 비하여  $50 \sim 150$  K 정도 높아지고, 그에 따른  $C_s^*$ 가 저하함을 알 수 있다. 또한 결과를 종합적으로 정리하여 보면, Fig. 12에 표시한 것과 같이 된다. 즉, 난류 및 층류의 데이터 모두  $T_{bg}^*$ 가 같으면 거의 동일 선상에 표시됨을 알 수 있었다. 결국, 온도경계층의 영향은 작다고 판단된다.

#### 4. 결 론

당량비 2.1의 프로판-산소-불활성가스에 대하여 정적 연소기내 난류 및 층류 예혼합기 연소에 있어서 매연생성량을 레이저광 감쇠법에 의해, 연소가스온도를 2색법에 의해 측정하고, 매연생성시 압력 및 온도의 인자와 온도경계층이 매연생성량에 미치는 영향을 조사하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 정적 연소기내의 층류연소는 관측부의 가스는 실험조건 등에 관계없이 이동하지 않았지만, 난류의 경우에는 가스가 상당히 많이 이동되고 있음을 확인했다.

2) 일정한 당량비에서 온도가 높을수록, 또한 압력이 낮을수록 매연생성량은 감소되었다.

3) 난류연소는 층류연소에 비하여 연소기간이 단축되어 열손실이 저하하기 때문에, 연소가스온도는 증가하고 이에 따른 매연생성량은 감소되었다.

4) 본 정적연소기의 층류와 난류 연소경우에 있어서 동일한 연소가스온도에서는 매연생성량도 같기 때문에, 온도경계층의 영향이 작았다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : R01-2000-000-00307-0), 2003년도 BK21사

업, 항공기부품기술연구소, 산업자원부 지역특화 과제의 부분적인 지원에 의해 일본 로타리 요네하마(米山)장학회(재단법인)의 단기방문 프로그램을 활용하여 동경공업대학 공학부 제어시스템공학과 에너지변환 연구실(Kamimoto Takeyuki 교수)과 국제공동연구로 수행된 것임을 밝혀두며, 도움을 준 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한, 고속도 카메라 촬영시의 연소압력과 화염사진을 시간적으로 대응시키기 위한 전자회로 제작에 도움을 주고, 많은 격려와 지원을 해 준 메이지대학의 Tsuchiya Kazuo교수에게도 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Kamimoto, T., Nakazima, T., and Bae, M. W., "Temporal Measurement of Size and Number Density of Soot Aggregates in Diesel Exhaust," Proceedings of Busan Engine International Symposium 2001, The Korean Society of Automotive Engineers, pp. 19 ~ 24, 2001.
- [2] Hawker, P., Huthwohl, G., Henn, J., Koch, W., Luders, H., Luers, B., and Stommel, P., "Effect of a Continuously Regenerating diesel Particulate Filter on Non-Regulated Emissions and Particle Size Distribution," SAE 980189, pp. 37 ~ 44, 1989.
- [3] Raatz, T., and Mueller, E., "Examination of Particle Size Distribution of Homogeneous and Conventional Diesel Combustion," SAE 2001-01-3576, pp. 1 ~ 12, 2001.
- [4] Bae, M. W., "A Study on the Soot Formation in Premixed Combustion at High Pressures," Doctoral Dissertation of Tokyo Institute of Technology, pp. 1 ~ 168, 1989.
- [5] Bae, M. W., and Kim, K. S., "A Study on Soot Formation in Premixed Constant-Volume Propane Combustion,"

- KSME Journal, Vol. 8, No. 2, pp. 175 ~ 182, 1994.
- [6] Dalzell, W. H., and Sarofim, A. F., "Optical Constants of Soot and Their Application to Heat Flux Calculations," Trans. of ASME, J. of Heat Transfer 91, pp. 100 ~ 104, 1969.
- [7] Park, C., and Appleton, J. P., "Shock-tube Measurements of Soot Oxidation Rates," Combustion and Flame 20, pp. 369 ~ 379, 1973.
- [8] Delfau, J. L., Michaud, P., and Barassin, A., "Formation of Small and Large Positive Ions in Rich and Sooting Low-Pressure Ethylene and Acetylene Premixed Flames," Combustion Science and Technology, Vol. 20, pp. 165 ~ 177, 1979.
- [9] 松井 幸雄, 神本 武征, 松岡 信, 小栗 彰, "ディーゼル機関の火炎温度の測定に関する研究," "日本機械學會論文集(第2部), 第44巻, 第337號, pp. 228 ~ 238, 1978.
- [10] Li, X., and Wallace, J. S., "In-Cylinder Measurement of Temperature and Soot Concentration Using the Two-Color Method," SAE 950848, pp. 147 ~ 157, 1995.
- [11] 林載根, 裴明煥, 金鐘一, "高壓下の定積豫混合氣燃焼에 있어서 煤煙生成에 關한 研究," 大韓機械學會論文集, 第16巻, 第3號, pp. 589 ~ 597, 1992.
- [12] 浜本 嘉輔, 大川 尙男, 山本 弘明, 菅原 良輔, "密閉容器内燃料-空氣均一混合氣の燃焼に及ぼす亂れの效果," "日本機械學會論文集(B編)", Vol. 49, No. 444, pp. 1791 ~ 1798, 1983.
- [13] MacFarlane, J. J., Holderness, F. H., and Whitcher, F. S., "Soot Formation Rates in Premixed C<sub>5</sub>- and C<sub>6</sub>-Hydrocarbon Air Flames at Pressures up to 20 Atmospheres," Combustion and Flame, Vol. 8, pp. 215 ~ 229, 1964.
- [14] Mätzing, H., and Wagner, H. Gg., "Measurements about the Influence of Pressure on Carbon Formation in Premixed Laminar C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-Air Flames," Twenty-first Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1047 ~ 1055, 1986
- [15] Kamimoto, T., Bae, M. W., and Kobayashi, H., "A Study on Soot Formation in Premixed Constant-Volume Propane Combustion," Combustion and Flame, Vol. 75, pp. 221 ~ 228, 1989.
- [16] Köylü, Ü. Ö., Mcenally, C. S., Rosner, D. E., and Pfefferle, "Simultaneous Measurements of Soot Volume Fraction and Particle Size/ Microstructure in Flames Using a Thermophoretic Sampling Technique," Combustion and Flame 110, pp. 494 ~ 507, 1997.

## 저 자 소 개



### 배명환 (裴明煥)

1954년 10월 24일생. 1977년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1989년 동경공업대학 대학원 기계공학전공 박사과정수료(공학박사). 현재 경상대학교 공과대학 기계항공공학부 교수. 한국내연기관협회의 이사. 한국자동차공학회 평의원. 당학회 평의원



### 안수환 (安守煥)

1953년생. 1976년 부산수대 졸업. 1981년 부산수대 대학원 졸업(석사). 1990년 캐나다 Ottawa 대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1995년 부산대학교 대학원 생산기계공학과 졸업(박사). 1980년~현재 경상대학교 기계항공공학부 교수. 당학회 중신회원