

## 고온·고압 정적 연소기내 난류 프로판 예혼합 화염의 매연생성에 관한 연구

### A Study on Soot Formation of Turbulent Premixed Propane Flames in a Constant-Volume Combustor at High Temperatures and High Pressures

배 명 환\*  
Myung-whan Bae

#### ABSTRACT

The soot yield has been studied by a premixed propane-oxygen-inert gas combustion in a specially designed disk-type constant-volume combustion chamber to investigate the effects of pressure, temperature and 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. 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. The pressure and temperature during soot formation are changed by varying the initial charge pressure and the volume fraction of inert gas compositions, respectively. It is found that the soot yield increases with dropping temperature and rising pressure at constant equivalence ratio, and 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.

주요기술용어 : Turbulent combustion(난류연소), Soot yield(매연생성량), Premixed flame(예혼합 화염), High pressure(고압), Constant-volume combustion chamber(정적 연소기), Laser extinction technique(레이저광 감쇠법)

#### 1. 서 론

디젤기관, 가스터빈, 화력발전소 등의 각종 연

\* 회원, 경상대학교 수송기계공학부,  
생산기술연구소

소 시스템에서 배출되는 탄소상 미립자(이하 매연이라고 칭함)는 대기오염물질로서 그 저감대책이 강하게 요구되고 있다. 연소시스템의 매연생성에 대해서는 아직도 알려지지 않는 부분이 많이 있지만, 대체로 다음과 같은 과정에 의해 생성되는 것으로 알려져 있다. 즉, 연소기에 분사된 연료는 고온 연소가스로부터의 대류와 복사 에 의한

열전달 및 혼합으로 인해 고온이 된 다음,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$  등의 불포화 저급 탄화수소로 열분해되고, 이들이 서로 중합(polymerization), 축합(condensation) 등을 반복하여 다환방향족 탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbon)로 됨과 동시에 탈수소화가 진행되어 분자량  $10^6$  정도로 고분자화한 단위 직경 수십 nm의 입자인 매연 미립자로 된다.

매연 미립자의 핵생성, 성장 등에 관한 동역학적 연구는 현재 다각도로 진행되고 있는데, 생성과정에 관해서는 몇 개의 모델이 제안되고 있다.<sup>1,2)</sup> 이러한 매연생성에 관한 동역학적 모델을 이해할 수 있게 되면, 화염내의 유체역학적 및 열역학적 거동도 동시에 해석이 가능하게 되어 연소시스템에서 생성 및 배출되는 매연 미립자에 관한 제반 현상이 통일적으로 해석될 수 있을 것으로 예상되지만, 현재 아직 그러한 단계에 도달하지 못하고 있기 때문에, 이론적인 연구접근과는 다르게 실험적으로 매연 미립자의 생성조건, 생성량 등을 현상론적으로 조사하고 있다.<sup>3,4)</sup> 매연 미립자의 생성조건과 생성량은 연료의 종류, 당량비, 압력, 온도, 시간 등의 함수이고, 이러한 함수관계를 대표적인 화염이나 고온장에서 구하는 것은 실제의 연소 시스템에 대한 매연 미립자의 저감을 위한 방책을 세우는 데에 유용할 뿐만 아니라, 위의 동역학적인 연구를 위한 총체적인 자료를 제공한다고 하는 의미에서도 중요하다.

디젤기관, 가스터빈 등의 연소기관은 확산화염이기 때문에, 어느 혼합기 덩어리를 라그랑주(Lagrange)적으로 추적하면 당량비는 확산에 의해 시시각각으로 변화하고, 또한 온도도 연소나 열전달에 의해 시간적으로 변화된다. 따라서 이와 같은 경우에는 난류확산이나 분자확산이 혼합기 덩어리의 당량비나 온도의 시간적 경과를 지배하고 있기 때문에, 이들이 확산화염에 있어서 매연생성 및 산화 과정의 이해를 곤란하게 하는 큰 요인이라고 생각된다. 또한, 실제의 연소기관

은 고압 분위기하에서 매연이 생성되고 있음에도 불구하고, 연구의 대상으로 삼고 있는 대부분의 정상 버너연소에서는 대기압 이하에서 매연생성을 조사하고 있기 때문에, 실제의 매연생성 과정을 이해하고 파악하는데 어려움이 발생한다.

본 연구에서는 연소기관의 매연생성 과정을 해명하는 기초적 자료로서 사용하고, 현재 수행하고 있는 매연농도 및 매연입경의 동시측정 연구에 대한 기초연구로서 활용하기 위하여, 확산과정을 제외시켜 단순화한 예혼합기 연소의 매연생성 과정을 관찰하고, 고온·고압의 분위기하에서 매연농도를 측정할 수 있는 특수한 정적 연소기를 제작하였다. 이러한 연소기내에 프로판-산소-불활성가스 예혼합 화염이 매연생성량에 미치는 압력, 온도 및 난류의 영향을 온도 및 압력의 파라미터를 분리해서 조사하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치

고온·고압하의 예혼합 화염에서 연소가스온도 및 매연생성을 계측하기 위하여 설계하고 제작한 연소실은 직경 100 mm, 두께 14 mm의 원판형이고, 연소실 주변에는  $45^\circ$  간격으로 8개의 점화 플러그가 설치되어 있다. 상세한 실험장치에 대해서는 저자의 문헌<sup>5)</sup>을 참고하기 바란다.

매연생성에 대한 투과광 감쇠와 2 파장에 대한 자발광 강도를 측정하기 위한 광학계 데이터 처

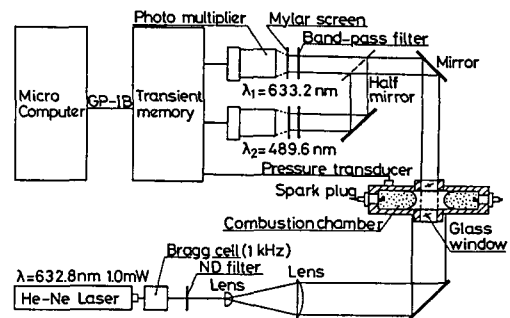


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental arrangement

리 시스템을 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 레이저 광속을 주파수 1 kHz로 단속적으로 입사시켰다. 본 연구에서는 관찰영역에 대한 연소실 중심부근의 평균적인 매연농도의 변화를 측정하기 위하여 그림과 같은 광학시스템에 의해 레이저로부터의 광속을 확대해서 사용하였다. 레이저 광속만을 직접 입사시키는 방법도 시도하여 보았지만, 양방법의 투과율 측정값이 거의 일치했기 때문에, 확대된 레이저광을 이용했다. 또한 부력의 영향을 작게 하기 위하여 연소기를 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 관측용 유리창을 통과하여 연소실내를 지나간다. 연소실의 반대방향에 있는 반사경에서 다시 직각으로 굴절된 실효파장  $\lambda_1 = 633.2 \text{ nm}$ (FWHM 3 nm)의 투과광 및 매연으로부터의  $\lambda_2 = 489.6 \text{ nm}$ (FWHM 2.5 nm)에 대한 자발광 강도는 간섭필터를 통과하여 마이러막(Mylar screen)에 닿은 후, 이들 강도를 광전자 증배관(photomultiplier)에 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 매연 생성량을 산출했다.

## 2.2 측정방법

화염중에 불규칙적으로 부유하는 매연입자군에 파장  $\lambda$ 의 광을 입사시킬 경우, 투과율  $\tau$ 와 매연체적농도  $f_v$ 의 관계는 Lambert-Beer의 법칙 및 Rayleigh의 식<sup>3)</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  $L$ 은 광로장이고,  $m$ 은 매연의 복소굴절률인데,  $m$ 은 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 정과라관계 연료를 사용한 경우의  $C_s$ 와  $f_v$ 의 관계는 다음과 같이 된다.<sup>3)</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  $n$ 은 연료분자중의 탄소원자수,  $\phi$ 는 혼합기의 당량비,  $f_{st}$ 는 이론 연료-산소비,  $DRm$ 는 (불활성가스의 질량)/(혼합기의 질량),  $\rho_s$ 는 매연의 밀도( $1.8 \text{ g/cm}^3$ )<sup>7)</sup>,  $\rho_{bg}$ 는 연소가스의 밀도를 나타낸다.

화염자체의 발광중에는 간섭필터를 통과하여 광전자 증배관에서 검출되는 레이저 파장에 해당하는 광이 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. 뒤에 나오는 Fig. 2에서 투과광 강도에 비하여 자발광 강도가 상당히 큼을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 브라그셀을 이용해서 투과광 및 자발광 강도를 동시에 측정하여 자발광 강도를 뺀 투과광 감쇠법을 이용해서 매연농도를 측정했다.

매연입자의 열복사에 주목하는 2 색법에서는 화염중의 매연입자 온도를 측정하기 때문에, 매

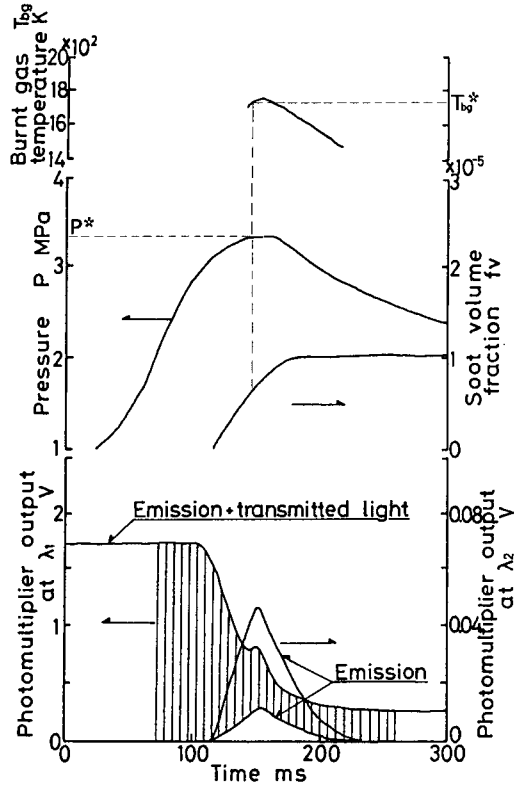


Fig. 2 Typical data of emissions, emitted + transmitted light, pressure P, soot volume fraction  $f_v$  and burnt gas temperature  $T_{bg}$  as a function of time. Conditions : laminar combustion, 8 points ignition, equivalence ratio  $\phi = 2.1$  and initial pressure  $P_i = 0.89$  MPa

연입자 온도와 주위 연소가스온도와와의 관계를 파악할 필요가 있다. 매연입자의 표면반응이 없는 경우에는 매연입자 온도와 주위의 연소가스온도는 거의 같다고 보고되고 있는데, 표면반응이 있는 경우에도 매연입자 온도와 주위의 연소가스온도는 거의 일치한다고 보고되고 있다.<sup>8-10)</sup> 다른 2 파장의 자발광 강도를 검출해서 연소가스온도를 구하는 2 색법의 온도측정에는 크게 상대값 및 절대값 측정법의 두 가지 방법이 있는데, 본 연구에서는 상대값 측정법으로부터 변형시킨 개량 2 색법을 사용하였다.<sup>3,9,11)</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 사출률이고, 하첨자 1, 2는 각각 실효파장  $\lambda_1, \lambda_2$ 의 값을 나타낸다. 장치상수  $\alpha$ 와 실효파장  $\lambda_1$  및  $\lambda_2$ 는 흑체로(black body furnace)<sup>9)</sup>를 이용하여 검정했다.

Fig. 2에는 당량비  $\phi = 2.1$ , 초기압력  $P_i = 0.89$  MPa, 불활성가스중의 아르곤 체적비율이 0 인 경우의 측정 및 해석 결과를 보여주고 있다. 그림의 하단에는 출력된 투과광 및 자발광 강도의 생데이터를, 중단에는 압력변환기에 의해 측정된 압력 P와 매연체적농도  $f_v$ 를, 상단에는 연소가스온도  $T_{bg}$ 를 나타내고 있다. 그림에서 압력이 최고값에 달하는 전후에서 매연생성이 일어나고 있음을 알 수 있다. 매연생성은 온도와 압력의 시간이력의 영향을 받는다고 생각되는데, 본 실험에서는 그림으로부터 알 수 있는 것처럼, 매연생성중에 연소가스온도  $T_{bg}$ 도, 압력 P도 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 채용하여 각각  $P^*, T_{bg}^*$ 로 나타낸다. 여기서  $P^*$ 는 초기압력을 변화시킴에 의해 변화시킬 수 있다.  $T_{bg}^*$ 는 초기압력에 따라서도 당연히 변하지만, 불활성가스중의 질소와 아르곤 체적비율을 바꾸면 변화시킬 수 있다. 매연생성량  $Cs^*$ 는 그림의  $f_v$ 의 최종값을 이용해서 산출했고,  $f_v$ 의 최종값은 연소가 종료되어 매연체적농도  $f_v$ 가 일정하게 된 후의 50 ms 동안에 대한 데이터를 합산하여 평균값으로 구했다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 관찰영역의 연소가스 거동

연소실내의 화염흐름에 대한 화염거동을 정성

적으로 관찰하기 위하여 정적 연소기 중심부 10 mm의 관찰영역에 대한 고속도 레이저 쉬리렌 및 직접사진을 촬영했다. 레이저 쉬리렌 사진 촬영시에는 2 개의 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, 고

속도 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

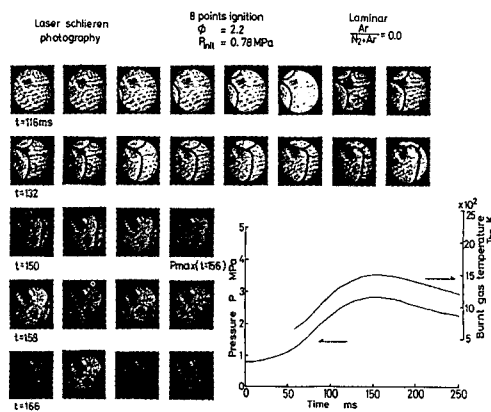


Fig. 3 High-speed laser schlieren photographs in observed region. Condition : laminar combustion, eight points ignition, equivalence ratio  $\phi = 2.2$ , initial pressure  $P_i = 0.78$  MPa and  $Ar/(Ar + N_2) = 0$

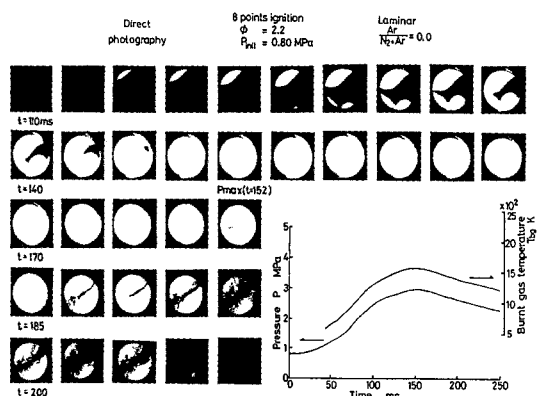


Fig. 4 Direct photographs in observed region. Condition : laminar combustion, eight points ignition, equivalence ratio  $\phi = 2.2$ , initial pressure  $P_i = 0.80$  MPa and  $Ar/(Ar + N_2) = 0$

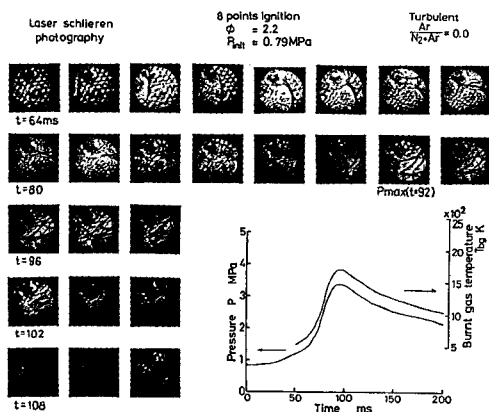


Fig. 5 High-speed laser schlieren photographs in observed region. Condition : turbulent combustion, eight points ignition, equivalence ratio  $\phi = 2.2$ , initial pressure  $P_i = 0.79$  MPa and  $Ar/(Ar + N_2) = 0$

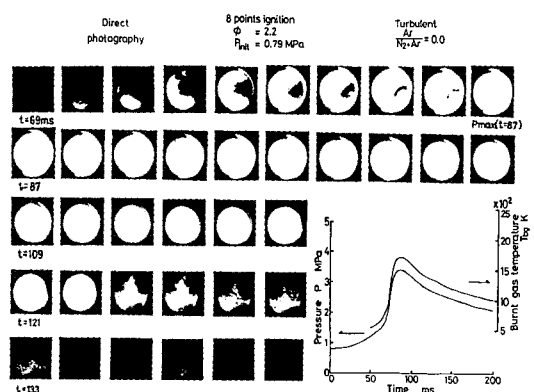


Fig. 6 Direct photographs in observed region. Condition : turbulent combustion, eight points ignition, equivalence ratio  $\phi = 2.2$ , initial pressure  $P_i = 0.79$  MPa and  $Ar/(Ar + N_2) = 0$

이용해서 타이밍 및 이벤트 마크가 표시되도록 간단한 회로를 제작하여 점화장치와 연결하였다.

매연이 생성되는 당량비의 분위기에서 연소가 스온도, 초기압력 등의 영향을 보기 위하여 24 조건에서 사진을 촬영하였는데, 경우에 따라서 재현성을 조사하기 위하여 동조건에서 2 ~ 3회의 촬영을 했다. 여기에서는 층류 및 난류 연소에 관해 대표적으로 당량비  $\phi = 2.2$ , 초기압력  $P_i = 0.78 \sim 0.80$  MPa, 불활성가스중의 아르곤의 체적비율  $Ar/(N_2 + Ar) = 0$ 인 조건에 대한 레이저 셔리렌 및 직접 사진의 촬영결과를 Fig. 3, 4, 5 및 6에 보여주고 있다. 난류연소의 경우에는 직경 50 mm, 높이 14 mm, 두께 2 mm의 원통에 대하여 직경 4 mm의 구멍이 27개 뚫린 난류발생기(구멍의 총면적비 15.4%)<sup>12)</sup>를 연소실내에 중심을 일치시켜 설치했다. 8개의 점화 플러그에서 전파되어 온 층류화염이 다공원통의 내측을 통과될 때 난류화염이 생성된다. 이렇게 하여 난류연소에 있어서의 매연생성을 조사했다.

2 종류의 고속도 사진으로부터 화염거동을 관찰해 보면 층류연소의 경우, 관찰영역에서의 화염은 연소가스와 미연가스를 분리하는 명확한 화염면이 보이고, 또한 화염면이 흐트러지지 않고 중심을 향해 화염이 전파되고 있다. 또한 여기에서는 제시하고 있지 않지만, 초기압력 및 불활성가스중의 아르곤의 체적비율에 관계없이 화염면은 중심을 향해서 진행하고 있다. 즉, 층류연소에서는 불활성가스중의 아르곤의 체적비율과 초기압력에 관계없이 측정위치에 있어서의 가스는 거의 이동하지 않음을 확인할 수 있다. 8개 점화 플러그에 의해 동시점화시키면 각 위치에서 착화한 화염은 선단이 원형을 이루면서 연소실 중심부를 향해 전파되고 있음을 이전의 연구결과<sup>13)</sup>에서 알 수 있었지만, 본 연구에서와 같이 관찰영역 10 mm에서 촬영된 사진에서는 동시에 점화되어 온 화염중 먼저 도착하는 화염이 존재함을 알 수 있다.

난류연소에서는 화염면이 보이는 경우도 있지만, 화염의 거동이 빠르고 난류도 발생하므로 층

류에 비하여 명확하지가 않다. 또한, 관찰영역에서의 난류화염은 빠른 화염전파속도와 난류에 의해 화염면의 요철이 많아지고, 8 개의 점화플러그에서 온 화염이 혼합되므로, 층류화염과 동일한 화염반경에 비하면, 난류화염의 내부에는 다량의 미연가스가 포함되어 있다.<sup>14)</sup> 즉, 난류화염의 경우에는 가스가 상당히 많이 이동되고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 매연생성량 $C_s^*$ 에 미치는 연소 압력과 온도의 영향

매연생성시의 압력  $P^*$ 가 증가할수록 초기 충전혼합기의 밀도가 높기 때문에, 최종 매연체적농도  $f_v^*$ 의 값도 커진다. 따라서 Fig. 7에는 매연생성의 정량적인 고찰을 하기 위하여 당량비  $\phi = 2.1$ 일 경우, 압력  $P^*$ 에 대한 매연생성량  $C_s^*$ 를 나타내고 있다. 여기서 L은 층류연소를, T는 난류연소를 나타낸다. 그림에서 당량비가 일정한 경우,  $P^*$ 의 증가와 함께  $C_s^*$ 가 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향은 정성적으로 정상 예혼합 화염<sup>15,16)</sup> 및 정적 예혼합 화염<sup>17)</sup>의 결과와 유사하게 나타나고 있다. 그러나 Fig. 7에는 압력의 영향과

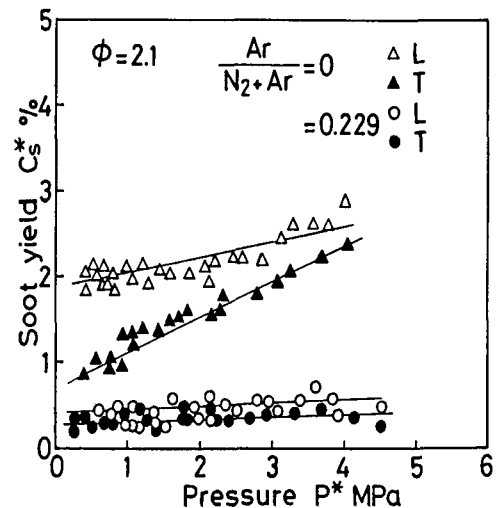


Fig. 7 Comparison of soot yield  $C_s^*$  versus pressure  $P^*$  between laminar and turbulent combustion at  $\phi = 2.1$

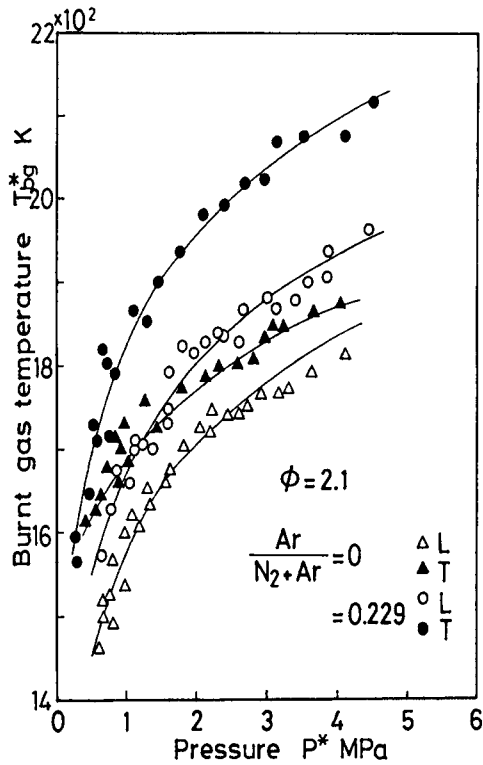


Fig. 8 Comparison of burnt gas temperature  $T_{bg}^*$  versus pressure  $P^*$  between laminar and turbulent combustion at  $\phi = 2.1$

동시에 온도의 영향도 포함되어 있다고 생각되므로, Fig. 7의 각 데이터에 대응하는  $T_{bg}^*$ 와  $P^*$ 의 관계를 나타낸 것이 Fig. 8이다.

Fig. 8에 표시한 것처럼 압력이 증가할수록 연소가스 단위질량당의 열손실 비율이 줄어들기 때문에,  $T_{bg}^*$ 도 높아지고 있다. 즉, Fig. 7의 데이터에는 압력뿐만이 아니고, 온도의 영향도 포함되어 있으므로, 매연생성량  $C_s^*$ 에 미치는 온도의 영향을 조사하기 위하여 당량비를 고정한 예혼합기중, 일정한 불활성가스 ( $N_2 + Ar$ )의 체적비율중 아르곤의 체적비율을 변화시켜 연소가스온도를 변화시키는 실험을 해 보았다.  $Ar/(N_2 + Ar) = 0$  및 0.229인 경우에 대한 데이터가 Fig. 7과 Fig. 8에 나타나 있는데, 아르곤의 체적비율을 증가시키면, 가스의 열용량이 저하하여  $T_{bg}^*$ 는 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 아르곤의 체적

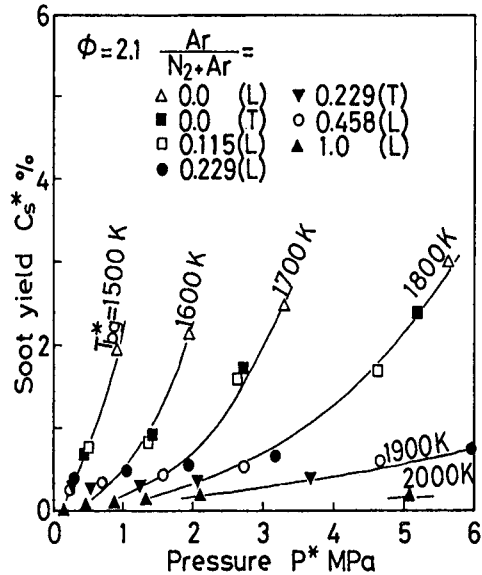


Fig. 9 Correlation between soot yield  $C_s^*$  and pressure  $P^*$  for laminar and turbulent combustion as a parameter of burnt gas temperature  $T_{bg}^*$  at  $\phi = 2.1$

비율을 증가시키면  $C_s^*$ 는 감소한다. 압력과 온도가  $C_s^*$ 에 미치는 영향을 분리하기 위하여, Fig. 7과 Fig. 8의 데이터를 가지고  $T_{bg}^*$ 를 파라미터로 한  $C_s^*$ 와  $P^*$ 의 관계를 다시 정리하면 Fig. 9와 같은 중요한 결과를 얻을 수 있다. Fig. 9에는 당량비  $\phi = 2.1$ 에 있어서  $Ar/(N_2 + Ar) = 0$  및 0.229 이외의 다른 데이터도 포함되어 있는데, 그룹에서 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 실험<sup>3)</sup>에서도 관찰되고 있는데, 그 이유로서는 고온이 될수록 열분해가 진행되어 열분해 생성물로부터 매연의 생성반응이 늦어지기 때문이라고 설명되고 있다. 예혼합 화염의 실험에서는 연소가스온도의 상승에 따라  $O_2$ ,  $OH$  등

에 의한 매연의 산화가 촉진되기 때문이라고 생각된다.<sup>3,18)</sup>

### 3.3 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 있어서 매연생성량을 측정하여 난류 및 층류 연소를 비교하여 검토해 보았다.

당량비  $\phi = 2.1$ 에 있어서  $Ar/(N_2 + Ar) = 0$  및 0.229의 경우, 층류 및 난류 연소에 대해서 매연생성시의 압력  $P^*$ 와  $T_{bg}^*$ 의 관계를 Fig. 8에, 이에 대응한  $P^*$ 와 매연생성량  $C_s^*$ 의 관계를 Fig. 7에 보여주고 있다. 그 결과, 난류연소에서는 연소기간이 짧아진 만큼 연소가스온도  $T_{bg}^*$ 가 층류연소에 비하여 50 ~ 150 K 정도 높아지고, 그에 따른  $C_s^*$ 가 저하됨을 알 수 있었다. 또한 그 결과를 종합적으로 정리하여 보면, Fig. 9에 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. 결론

정적 연소기내 프로판-산소-불활성가스의 난류 및 층류 예혼합기 연소에 있어서 당량비 2.1인 경우, 매연생성량은 레이저광 감쇠법에 의해, 연소가스온도는 2 색법에 의해 계측하고, 압력 및 온도의 인자가 매연생성량에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 주요한 결과를 얻었다.

1) 제작된 정적 연소기는 관측부의 예혼합기가 가장 고압이 된 연소말기 단계에서 정압연소하고, 층류연소의 경우에는 관측부의 가스가 이동하지 않기 때문에, 고압하의 매연생성과정에 대

한 시간적 변화를 관측할 수 있다.

2) 매연생성량은 당량비가 일정한 경우에는 온도를 저하시킬수록, 또한 압력을 증가시킬수록 증가한다.

3) 층류연소에 비하여 난류연소는 열손실의 저하로 인한 연소가스온도가 높아지기 때문에, 매연생성량이 감소한다.

본 연구의 최종목표는 실기관의 배기관에서 배출되는 매연 농도 및 입경을 직접 실시간에 동시 측정할 수 있는 계측기를 개발하는 것인데, 본 논문에서는 1 단계로 매연농도 계측을 시도하였고, 현재, 매연입경을 측정할 수 있는 시제품도 국제공동연구에 의해 개발중에 있다.

## 후 기

본 연구는 일본 로타리 요네야마(米山)장학 재단법인의 단기방문 프로그램과 2000년도 두뇌한국 21사업의 부분적 지원에 의하여 동경공업대학 제어시스템공학과 에너지변환 연구실(神本 武征 교수 ; 현재 토카이대학 교수)과의 국제공동연구로 수행된 것임을 밝혀두며, 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 고속도 카메라 촬영시의 연소압력과 사진을 시간적으로 대응시키기 위한 회로제작에 도움을 주시고, 많은 격려와 지원을 아끼지 않으신 메이지대학의 土屋 一雄 교수에게도 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) I. M. Kennedy, "Models of Soot Formation and Oxidation," Prog. Energy Combustion Sci., Vol. 23, pp.95-132, 1997.
- 2) A. Kazakov and Frenklach, M., "Dynamic Modeling of Soot particle Coagulation and Aggregation : Implementation with the Method of Moments and Application to High-Pressure Laminar Premixed Flames," Combustion and Flame, Vol. 114, pp. 484-501, 1998.



- 3) 裴明煥, “高壓下の豫混合氣燃焼におけるすす生成に關する研究,” 東京工業大學 博士學位論文, pp.1-168, 1989.
- 4) M. W. Bae and K. S. Kim, “A Study on Soot Formation in Premixed Constant-Volume Propane Combustion(Effects of Pressure, Temperature and Equivalence Ratio),” 1994 KSME Journal, Vol. 8, No. 2, pp.175-182, 1994.
- 5) T. Kamimoto, M. W. Bae and H. Kobayashi, “A Study on Soot Formation in Premixed Constant-Volume Propane Combustion,” Combustion and Flame, Vol. 75, pp.221-228, 1989.
- 6) W. H. Dalzell and A. F. Sarofim, “Optical Constants of Soot and Their Application to Heat Flux Calculations,” Trans. of ASME, J. of Heat Transfer 91, pp.100-104, 1969.
- 7) C. Park and J. P. Appleton, “Shock-tube Measurements of Soot Oxidation Rates,” Combustion and Flame 20, pp.369-379, 1973.
- 8) J. L. Delfau, P. Michaud and A. Barassin, “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, “ディーゼル機關の火炎溫度の測定に關する研究,” 日本機械學會論文集(第2部), 第44卷, 第337號, pp.228-238, 1978.
- 10) X. Li and J. S. Wallace, “In-Cylinder Measurement of Temperature and Soot Concentration Using the Two-Color Method,” SAE 950848, pp.147-157, 1995.
- 11) 배명환, “변형 2색법에 의한 예혼합기 연소의 연소가스온도 측정에 관한 연구,” 한국자동차공학회 논문집, 제7권, 제8호, pp.43-54, 1999.
- 12) 배명환, “고압 예혼합 프로판 화염의 매연생성에 미치는 난류연소의 영향,” 한국박용기관학회 1998년도 추계학술대회 논문집(KOSME 98AO17), pp.123-128, 1998.
- 13) M. W. Bae and T. Kamimoto, “Soot Formation Rate in Premixed Combustion at High Pressures,” High-Speed Photography and Photonics(The International Society for Optical Engineering), Vol. 2513, Part 1, pp.463-471, 1995.
- 14) 浜本 嘉輔, 大川 尚男, 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.
- 15) J. J. MacFarlane, F. H. Holderness and F. S. Witcher, “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.
- 16) H. Mätzing and H. Gg. Wagner, “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.
- 17) T. Kamimoto, M. W. Bae, and H. Kobayashi, “A Study on Soot Formation in Premixed Constant-Volume Propane Combustion,” Combustion and Flame, Vol. 75, pp.221-228, 1989.
- 18) Ü. Ö. Köylü, C. S. Mcenally, D. E. Rosner, and L. D. 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.