

## 변형 2색법에 의한 예혼합기 연소의 연소가스온도 측정에 관한 연구

### A Study on the Measurement of Burnt Gas Temperature in Premixed Combustion by Modified Two-Color Method

배 명 환\*  
Myung-whan Bae

#### ABSTRACT

The effects of equivalence ratio and pressure on burnt gas temperature in premixed fuel rich propane- oxygen-inert gas combustion are investigated over the wide ranges of equivalence ratio from 1.5 to 2.7 and pressure from 0.1 to 7 MPa by using a specially designed disk-type constant-volume combustion chamber. The premixtures are simultaneously ignited by eight spark plugs located on the circumference of combustion chamber with 45 degree intervals. The eight converging flames compress the end gases to high pressures. The burnt gas temperature is measured by the modified two-color pyrometry method. The transmissivity in the chamber center during the final stage of combustion at the highest pressure is measured by in situ laser extinction method. It is found that a temperature difference between the burnt gas temperature measured by modified and conventional two-color method is 10 to 20 K, but the accuracy of the modified two-color method is higher if the local transmissivity in observed region is uniform, and the combustion at higher pressures results in higher burnt gas temperature because of the relative reduction of heat losses at higher gas density conditions and the burnt gas temperature increases as the volume fraction of argon is increased because the specific heat of argon is lower compared to that of nitrogen with a constant equivalence ratio.

주요기술용어 : Premixed Combustion(예혼합기 연소), Burnt Gas Temperature(연소가스온도), Modified Two-Color Method(변형 2색법), Equivalence Ratio(당량비), Converging Flame(수축화염), Transmissivity(투과율)

#### 1. 서론

내연기관의 배출물 생성을 억제시킬 수 있는 기관을 개량하기 위해서는 연소과정을 상세

하게 이해하는 것이 필요하다. 그러나 연소과정은 실제기관의 연소실 형상, 혼합기 유동 등의 물리적 요인과 연료-공기 혼합기의 연소특성에 의존하는 등 복잡하기 때문에, 실험적인 검증이 요구되는 경우에는 기관내의 연소과정을 단순화한 모델을 제안하여 사용하고 있다. 최근, 이러한 여러 가지 모델화 실험장치가 개

\* 정회원, 경상대학교 항공기계공학과,  
생산기술연구소

발되고 있지만, 유용한 자료를 얻기 위해서는 좋은 특성 및 실용적 모델장치를 이용해서 얻어진 많은 실험 데이터로부터 실제의 연소현상과 비교하고 확인할 수 있어야 한다. 이와 같은 모델 실험장치중의 하나로서 고온·고압하의 연소특성과 실제기관의 연소과정을 보다 잘 시뮬레이션할 수 있는 정적 연소기를 설계하여 사용해 왔다. 이하에 정적 연소기를 이용한 연소연구의 예를 몇 가지 열거해 본다.

Dyer 등<sup>1)</sup>은 상하면이 유리로 된 디스크형 정적 연소기를 이용해서 연료과농 프로판-공기 예혼합 전파화염내의 매연생성을 관찰하여 평형론적인 예측을 훨씬 초과한 매연생성량이 화염면에서 빠르게 생성되고 있음을 명백히 하고 있다. 이 연구에서는 당량비와 단열화염 온도 선도상에 매연의 생성한계를 나타내고 있지만, 매연생성량의 정량적 평가나 화염온도의 측정이 이루어져 있지 않았고, 또한 1점 점화이기 때문에, 용기내 각 위치에서 가스가 이동되어 각 점에서의 측정값에 대한 정확도가 의문시되고 있다.

田坂 등<sup>2)</sup>은 정적용기내 예혼합기 연소에 있어서 적외역 다파장의 흡수발광법에 의한 온도측정과 쉬리렌사진을 병용하여 온도분포에 영향을 주는 인자와 이것이 NO 생성량에 미치는 영향에 대해서 조사한 결과, 중심부에는 일정한 온도장이 존재하고, 공간분포에 대한 연소초기 부분의 가스온도는 시간과 함께 냉각되어 그 후의 압력상승에 의해 고온이 되지 않고 거의 일정하게 된다고 했다. 또한 온도의존성이 높은 NO농도에 대해서는 시간적 온도분포를 고려할 필요가 있다고 했다.

Lim 등<sup>3)</sup>은 정적용기내에 있어서 대기압의 프로판-공기 예혼합기에 도입 스파크로부터 최초의 1~2 ms중, 고속도(10,000 fps) 레이저 쉐리렌계를 이용하여 화염핵의 전개를 조사했다. 그들은 팽창속도와 단열화염온도에 의거한 화염핵의 연소속도는 약 1ms로 거의 일정값에 도달하는데, 이 값은 화염곡률 및 전

극의 영향 때문에 평면정상화염의 연소속도보다 작다고 했다.

Bae 등<sup>4)</sup>은 정적 연소기내 프로판-산소-불활성가스 예혼합기 연소에 있어서 당량비 2.0~2.2, 압력 0.4~5.0 MPa, 온도 1600~1900 K의 넓은 범위에서 이들 인자와 매연생성량이 매연생성속도에 미치는 영향을 레이저광 감쇠법에 의해 조사하여, 기존의 연구결과와 같이 매연생성속도는 표면성장 속도식으로 나타낼 수 있고, 매연생성 속도상수는 압력, 당량비, 매연생성량과는 관계없이 온도만에 의존한다고 했다.

최근, 小原 등<sup>5)</sup>은 정적용기내에 메탄-공기 예혼합기를 8개의 방향에서 분사시켜 혼합기의 초기교란이 연소에 미치는 영향을 조사한 결과, 8개 방향의 분사에 의해 충전된 혼합기의 질량은 정적으로 혼합기를 대기압까지 충전한 경우에 비교하여 양이 적음에도 불구하고, 연소에 의해 비교적 고압을 얻을 수 있기 때문에, 기류에 초기교란을 주는 것이 중요하고, 회박연소시키는 경우에 대한 방법으로서도 유효하다는 것을 확인했다.

이 외에도 연소과정에 미치는 혼합기 난류의 영향 및 난류연소속도 계측<sup>6)</sup>, 정지 예혼합기중의 화염전파과정<sup>7)</sup>, 증상가스연소의 거동 관찰<sup>8)</sup>, 연소과정에 미치는 선회류의 영향<sup>9)</sup>, 예혼합화염에 미치는 유체역학적 조건의 영향<sup>10)</sup> 등 정적 연소기를 이용한 연구예가 많이 있다.

국내에서도 최근 정적 연소기를 이용하여 예혼합기 연소특성<sup>11,12)</sup>, 예혼합기 연소 및 라디칼 특성<sup>13)</sup> 등에 관한 연구를 하고 있다. 저자는 연소기관의 매연생성과정 모델링용 고온·고압 정적 연소기를 설계하고 제작하여 연소특성에 관한 성능을 조사하여 실제기관의 연소과정에 접근하는 시뮬레이션이 가능함을 밝힌 적이 있다.<sup>14)</sup>

본 연구에서는 원판형 정적 연소기의 주변부에 설치된 8개의 점화플러그를 동시에 점화

시켜, 8개 화염이 수축하는 용기 중심부의 고온·고압 연소가스를 관찰하는 새로운 방식을 채택하여, 고온·고압하의 가스이동이 없는 연소기 중심부에서 연소가스온도 측정에 대한 변형 2색법 적용의 타당성을 검토하고, 당량비 및 연소압력을 파라미터로 한 연소가스온도를 정량적으로 측정하여 이들 파라미터의 영향을 조사하여 보았다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1에서는 고온·고압하의 연소가스온도를 측정하기 위하여 설계하고 제작한 정적 연소기를 나타내고 있다. 연소실은 직경 100 mm, 두께 14 mm의 원판형이고, 연소실 주변에는 45° 간격으로 8개의 점화플러그가 설치되어 있다. 8개의 점화플러그에 의해 용기내 충전된 프로판(순도 99.5%)·산소·불활성가스의 연료과농 예혼합기에 동시점화하면, 화염은 주변부로부터 중심을 향해 미연영역을 압

축하면서 전파하여 중심부가 최후에 연소한다. 연소실 중심의 상하면에는 직경 10 mm의 유리창이 설치되어 있고, 이 창을 통하여 투과광 감쇠법에 의하여 투과율을 측정한다. 이 방식에 의하면 관측부의 예혼합기는 가장 고압이 된 연소종료시에 정압연소하고, 관측부의 가스가 이동하지 않는다고 하는 장점이 있다. 또한, 충전 혼합기의 초기압력을 변화시킴에 따라 연소압력을 바꿀 수가 있다.

연소실 상부 덮개에는 압력측정용의 스트레인 게이지식 압력변환기가, 하부 덮개에는 초기온도 측정용의 직경 0.3 mm의 K형(chromel-alumel) 열전대가 설치되어 있다. 또한 혼합기의 흡입, 진공펌프로부터의 흡입 및 연소가스의 배출에 이용되는 밸브가 1개씩 상하의 덮개에 각각 부착되어 있고, 유리창면 상에는 수증기의 응축을 방지하기 위하여 용기전체를 420 K 정도로 리본 가열기(ribbon heater)에 의해 가열하였다.

정적 예혼합기 연소의 매연생성을 투과광 감쇠법에 의하여 측정하는 경우, 연소가스온도가 높으면 투과율이 처음에는 감소하여 일단 극소값에 달한 후 다시 약간 증가하고, 그 후에 일정값에 도달하는 양상이 관찰되었다.<sup>15)</sup> 화염으로부터 광전자 증배관까지의 거리를 변화시킨 실험을 해 본 결과, 거리를 짧게 할수록 극소값이 작아짐을 확인했다. 이것은 화염을 통과하는 레이저 광속이 슈리렌 효과에 의해 밀도가 증가하는 방향으로 굽어지는 현상, 즉 투과광의 굴절이 원인임을 알았다. 매연생성량, 매연생성한계 등을 구하는 실험에서는 최종의 투과율, 즉 연소가 끝나 투과율이 일정하게 된 후의 값을 이용하므로 문제가 없지만, 투과율이 변화하는 과정중의 연소가스온도를 구하는 경우에는 슈리렌 효과의 영향을 제거하지 않으면 안된다.

Fig. 2에는 연소가스온도를 구하는데 필요한 투과율과 자발광 강도를 측정하기 위한 광학계 및 데이터 처리계를 보여주고 있다. 본

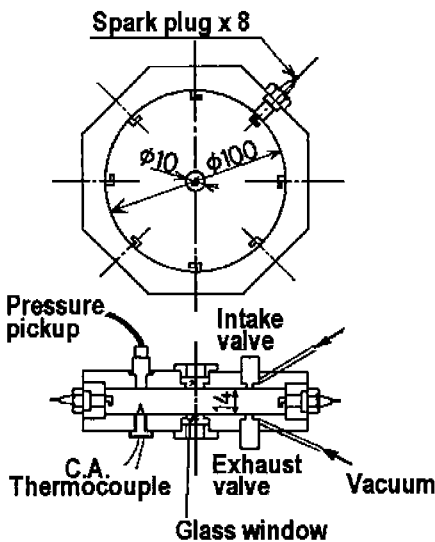


Fig. 1 Cross-section of constant-volume combustion chamber

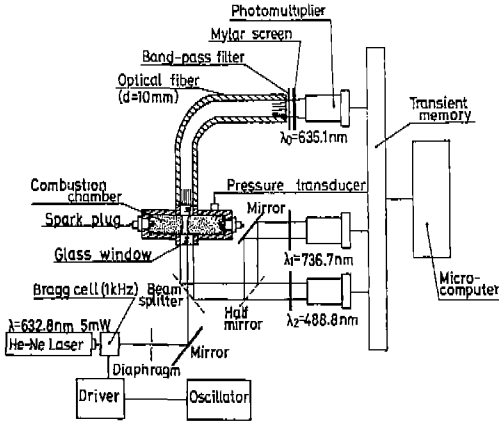


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental arrangement

정적 연소기의 화염은 전파속도가 느리기 때문에, 변형 2색법을 적용하는 경우에는 He-Ne 레이저(파장 632.8 nm, 출력 5 mW) 광원의 광속만을 이용하여 국소 투과율을 측정하였다. 또한, 자발광을 제거시킨 순수한 투과광만을 측정하여야 하므로, 레이저의 투과광과 매연의 자발광을 분리하기 위하여 브라그셀(Bragg Cell)에 의해 레이저광을 주파수 1 kHz로 단속적으로 입사했다. 이 브라그셀로부터 나온 광속은 온도측정용의 자발광을 검출하기 위한 광분리기(25 mm×38 mm, 투과율 25%)를 통과하여 연소기 하측의 유리창을 지나 입사된다. 연소기를 통과한 광속은 화염을 지날 때에 슈리렌 효과에 의해 굴절하지만, 굴절한 광속이 검출될 수 있도록 상면에 있는 직경 10 mm의 유리창에 접촉한 직경 10 mm의 광파이버(optical fiber)를 이용하였다. 중심파장  $\lambda_0 = 635.1 \text{ nm}$ 에 대한 투과광 및 매연의 자발광 강도가 광전자 증배관에 의해 측정된다. 한편, 하측에 있는 직경 10 mm의 유리창으로부터 나온 자발광은 광분리기(반사율 75%)에 의해 반사되어 하프미러(half mirror)에서 2방향으로 분리된 후, 실효파장  $\lambda_1 = 736.7 \text{ nm}$  및  $\lambda_2 = 488.8 \text{ nm}$ 의 광에 단

색화된다. 각각의 강도는 광전자 증배관에 의해 측정되어 2색법의 온도측정에 이용된다.

Fig. 3은 흑체로에 의한 광학계의 검정결과를 나타내고 있는데, 이 검정결과를의 기율기로부터 연소가스온도 측정용의 실효파장  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  및 장치상수  $\alpha$ 를 구하였다. 간섭필터의 중심파장과 거의 일치하고 있는 것으로부터 검정의 신뢰성을 입증할 수 있다.

## 2.2 변형 2색법

2개의 파장에 대한 자발광 강도를 검출하여 연소가스온도를 구하는 2색법의 온도측정은 크게 상대값 및 절대값에 의한 측정법으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 상대값에 의한 측정법을 변형한 2색법을 사용하였는데, 아래에 이 방법과 비교하기 위해 사용한 절대값에 의한 측정법을 간단하게 설명하고, 양방법의 적용범위에 대해서 검토해 보았다.

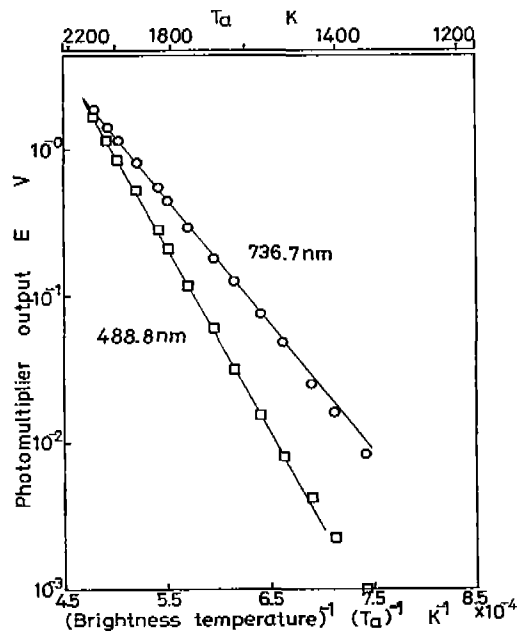


Fig. 3 Calibration curves of the optical detector intensity with brightness temperature by black body furnace

측정값비로부터 연소가스온도를 구하는 상대값에 의한 측정법에서는 측정시와 검정시의 측정장치 감광특성이 같으면, 입사광량에 의존하지 않는 온도를 구할 수 있다. 파장  $\lambda$ , 온도  $T$ 에 있어서 흑체의 단색 복사강도  $e(\lambda, T)$ 는 흑체의 단위면적에서 단위시간에 방출되는 파장  $\lambda$ 의 복사에너지인데, Planck의 법칙에 의해 다음과 나타낼 수 있다.

$$e(\lambda, T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp [C_2/(\lambda \cdot T)] - 1} \quad (1)$$

여기서  $C_1$ 은 제 1복사 상수이고,  $C_2$ 는 제 2복사 상수이다. 가시역에 대해서 흑체의 단색 복사강도  $e(\lambda, T)$ 를 Wien의 근사식에 적용하면 편리한데, 실제  $\lambda T < (0.3 \text{ cm} \cdot \text{K})$ 의 경우, 식 (1) 대신에 다음과 같은 Wien의 근사식은 오차 1% 이하로 근사시킬 수 있다.

$$e(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp [-C_2/(\lambda \cdot T)] \quad (2)$$

본 연구에서는 측정하는 연소가스온도  $T_{bg}$ 가 2500 K 이하이고, 연소가스온도를 구할 때의 가시역 파장이 488.8 nm 및 736.7 nm이므로,  $(\lambda T_{bg})$ 는 0.1222 및 0.1842가 되어 Wien의 근사식을 적용할 수 있는 조건을 충분히 만족하고 있다.

화염으로부터의 자발광을 파장  $\lambda$ 에 있어서 검출하면 검출기의 출력  $E(\lambda, T_{bg})$ 는 다음과 같이 되는데, 여기서  $\alpha$ 는 검출기에 들어오는 광속의 입체각, 검출기의 감도 등을 포함한 장치상수,  $\epsilon$ 는 화염의 사출률,  $T_{bg}$ 는 연소가스온도이다.

$$E(\lambda, T_{bg}) = \alpha \epsilon C_1 \lambda^{-5} \exp [-C_2/(\lambda \cdot T_{bg})] \quad (3)$$

2개의 파장  $\lambda_1, \lambda_2$ 에 있어서 검출기의 출력  $E_1, E_2$ 를 측정하면 연소가스온도  $T_{bg}$ 는 다음과 같은 식에 의하여 구할 수 있다. 여기서 첨자 1, 2는 각각 실효파장  $\lambda_1, \lambda_2$ 에 있어서 값을 나타낸다.

$$T_{bg} = \frac{C_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)}{\ln[\alpha_1/\alpha_2 \cdot \epsilon_1/\epsilon_2 \cdot E_2/E_1 \cdot (\lambda_2/\lambda_1)^5]} \quad (4)$$

흑체의 단색 복사강도를 Wien의 근사식에 의하여 나타내면, 휘염온도  $T_b$ 와 사출률  $\epsilon$ 의 관계는 다음과 같이 된다.

$$\epsilon = \exp [-C_2/\lambda \cdot (1/T_b - 1/T_{bg})] \quad (5)$$

한편, 휘염의 단색 사출률에 대해 Hottel-Broughton식이 성립한다고 가정하고, 파장  $\lambda_1, \lambda_2$ 에 대해 측정된 화염의 휘도온도  $T_{b1}, T_{b2}$ 를 대입하여 Newton Raphson법에 의해 다음과 같이 절대값에 의한 측정법의 연소가스온도  $T_{bg}$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & [1 - \exp \{-C_2/\lambda_1 \cdot (1/T_{b1} - 1/T_{bg})\}]^{\lambda_1^4} \\ & = [1 - \exp \{-C_2/\lambda_2 \cdot (1/T_{b2} - 1/T_{bg})\}]^{\lambda_2^4} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $a$ 는 파장범위에 의해 정해지는 상수인데, 가시역에서는  $1.38^{(6)}$ 을 사용했다.

본 연구에서는 식 (4)을 이용한 상대값의 방법으로 연소가스온도를 측정하였는데, 이 방법에서는 화염의 사출률을 미리 알고 있어야 한다. 여기서는 레이저광 감쇠법<sup>17)</sup>에 의해 측정된 관측영역의 투과율  $\tau$ 로부터 Kirchhoff의 법칙에 의해 파장  $\lambda_0(635.1 \text{ nm})$ 의 단색 사출률  $\epsilon_0$ 을 구하고, 이 값을 Hottel-Broughton 식에 대입하여 파장  $\lambda_1(736.7$

nm)의 사출률  $\epsilon_1$ 과  $\lambda_2$ (488.8 nm)의 사출률  $\epsilon_2$ 를 구할 수 있다. 시간간격에 대해서 구한 2개의 사출률  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ 를 식 (4)에 대입하여 풀면 연소가스온도를 구할 수 있다. 이 경우, 화염은 관측영역을 채울 필요가 있는데, 화염이 관측영역을 어느 정도 채우고 있는지는 이전 연구의 고속도 사진에 의해 확인했다.<sup>4,14)</sup>

그런데 당량비가 1.9 이하인 경우에는 매연 생성량이 동온도역일지라도 당량비 2.1~2.3의 1/10 정도<sup>17)</sup> 밖에 생성되지 않기 때문에, 2색법에 의한 온도측정의 정도가 상당히 떨어지리라 생각되고, 매연이 생성되지 않는 경우에는 측정온도를 구할 수 없다. 따라서 이러한 경우에는 다음과 같은 가정하에 간단한 열역학적 모델을 사용하여 압력변화로부터 식 (7)에 의해 연소가스밀도  $\rho_{bg}$ 를 계산하고, 이  $\rho_{bg}$ 를 상태방정식에 대입하여 온도를 계산했다.<sup>18)</sup>

- (1) 연소실내의 연소가스와 미연가스는 각각 시간적 및 공간적으로 균일하다.
- (2) 각 순간의 연소가스 및 미연가스 영역은 화학적 및 열역학적 평형이 성립한다.
- (3) 연소전후의 비열과 가스상수는 변화하지 않는다.
- (4) 온도상승에 의한 압력상승은 연소가스 질량비율 X에 비례한다.

$$\rho_{bg} = \frac{X}{[1 - (1 - X) \cdot (P_i/P)^{1/n}]} \cdot \rho_i \quad (7)$$

여기서  $X = (P - P_i)/(P_m - P_i)$ ,  $P_i =$  초기압력,  $P_m =$  최대압력,  $n =$  폴리트로프 지수(1.3) 및  $\rho_i =$  초기 혼합기 밀도이다. 열역학적으로 계산한 온도는 조건에 관계없이 변형 2색법에 의한 연소가스온도와 잘 일치되고 있음을 확인하였다.<sup>19)</sup>

## 2.3 실험조건

예혼합기의 연소가스온도를 독립적으로 변화시키기 위해서는 예혼합기의 초기온도나 불활성가스의 조성을 변화시키는 방법 등이 있지만, 본 연구에서는 초기온도를 고정시키고 불활성가스중의 아르곤이나 질소의 체적비율을 바꾸어 연소가스온도를 변화시켰다.

2색법에 의한 연소가스온도 측정은 매연생성 분위기의 화염조건이 아주 중요하다. 대기압하의 프로판-공기 예혼합기 화염에 있어서 매연생성 임계 당량비는 1.91로 알려져 있지만<sup>20)</sup>, 본 연구와 같은 고압하의 프로판-공기 예혼합기 화염에서도 매연생성 임계 당량비가 거의 1.9였다.<sup>19)</sup> 그런데 매연생성 임계 당량비는 온도의 함수이므로, 연소가스온도를 변화시킴에 의해 임계 당량비 이하 혹은 임계 당량비보다 훨씬 높은 당량비에서도 매연생성 분위기를 조성할 수도 있을 것이다.<sup>19)</sup>

본 연구에서는 임계 당량비 1.9를 중심으로 전후의 당량비 1.5, 1.7, 1.8, 1.9, 2.1, 2.2, 2.3, 2.5 및 2.7에서 연소가스온도를 변형 2색법에 의하여 측정했는데, 이 들에 대한 혼합기중의 각 성분 비율 및 단열화염온도에 대해서는 저자의 논문<sup>21)</sup>을 참고하기 바란다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 전형적 측정에

Fig. 4는 당량비 2.2, 초기압력  $P_i = 0.78$  MPa 및 불활성가스중 아르곤의 체적비율이 0인 경우의 전형적인 측정예를 나타내고 있다. 하단에는 중심파장  $\lambda_0 = 635.1$  nm에서의 투과광 및 자발광 강도, 실외파장  $\lambda_1 = 736.7$  nm와  $\lambda_2 = 488.8$  nm에서 자발광 강도의 시간변화를, 상단에는 압력 P와 기존 및 변형 2색법에 의한 측정온도의 시간변화를 나타내고 있다. 그림에서 광파이버의 수광면적이 크기 때문에, 파장  $\lambda_0$ 의 투과광 강도에 자발광 강도가 겹쳐서 나타

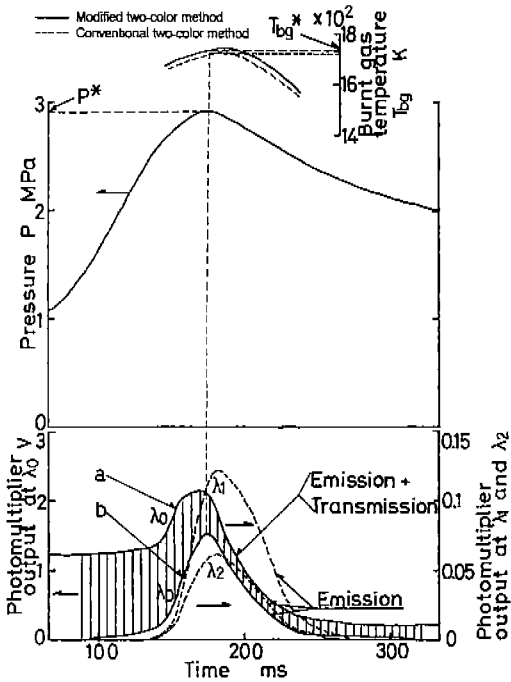


Fig. 4 Typical data of emissions, emitted + trans- mitted light, pressure P, and the burnt gas temperatures  $T_{bg}$  measured by modified and conventional two-color methods as a func- tion of time. Condition : laminar combus- tion, eight-point ignitions, equivalence ratio  $\phi = 2.2$ , and initial pressure  $P_i = 0.78$  MPa

나고 있음을 알 수 있다. 투과율은 측정된 레이저의 투과광 강도에서 자발광 강도를 제거시킨 다음 구하였다. 상단의  $T_{bg}$ 는 연소기 하측에서 매연의 자발광 강도를 검출하여 상대값의 변형 2색법에 의해 구했다. 뒤에 측정온도법의 타당성을 검토하였지만, 비교하기 위하여 기존 2색법의 절대값 측정에 의해 구한 연소가스 온도도 나타내고 있는데, 이 경우, 양자는 10~20 K 정도의 온도차가 있다.

투과율은 시간에 따라 다르기 때문에, 본 연구에서는 압력에 대한 연소가스온도의 데이터를 정리하기 위하여 파장  $\lambda_0$ 가 최고값인 시각의 압력과 온도를 대표값로서 채용하여  $P^*$ ,

$T_{bg}^*$ 로서 표시했다.

### 3.2 2색법에 의한 온도측정의 타당성 검토

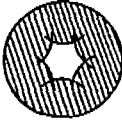
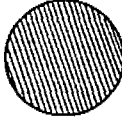
매연입자의 표면반응이 없는 경우에는 매연 입자온도는 주위의 가스온도와 거의 같다.<sup>22,23)</sup> 본 연구에서는 변형 2색법에 의한 온도측정의 경우, 투과율과 자발광 강도는 직경 10 mm의 유리창에 의해 측정하고 있는데, 관측영역내에 화염이 꽉 찬 상태에서 연소가스온도와 매연농도가 균일할 때에만 이 방법은 측정의 정확도가 높다.

Table 1은 기존 및 변형 2색법에 의한 연소가스온도 측정의 타당성에 대한 검토를 보여주고 있다. 변형 2색법은 검출기 출력과 휘도온도의 관계를 관찰영역보다 큰 흑체로의 검출구멍을 이용해서 검정한다. 기존의 2색법에서는 2개의 파장에 대한 휘도온도  $T_{b1}$ 과  $T_{b2}$ 를 식 (6)에 대입하여 연소가스온도를 구하므로, 화염이 관찰영역을 꽉 채우고 있는 상태(Table 1 중 상태 b)에서만 온도를 측정할 수 있다. 이 경우 관찰영역내 화염의 평균적 온도가 측정된다. 한편, 변형 2색법에서는 식 (4)에 양파장의 검출기 출력비  $E_2/E_1$ 를 대입하여 연소가스온도를 구하므로, 화염이 관찰영역을 꽉 채우고 있지 않은 상태(Table 1중 상태 a)의 온도도 측정이 가능하다. 단, 양파장의 사출률비  $\epsilon_1/\epsilon_2$ 를 알고 있어야 한다.

확대 레이저광에 의해 2색법을 적용한 이전 연구<sup>21)</sup>의 경우에는 측정된 관측영역의 투과율  $\tau_l$ 로부터 사출률을 측정하지만, 화염이 꽉 차 있지 않았을 때는 오차가 발생할 것이다. 레이저광만을 입사시킨 경우에는 화염내의 한점에서 레이저광 감쇠법에 의해 사출률을 측정하고, 화염에 대한 사출률의 대표값으로 이 국소 사출률을 가정하여 사용한다. 연구에 적용하고 있는 매연생성시의 연소가스온도는 거의 대부분 연소종료후이다. Fig. 4의 측정예에서 알 수 있는 것처럼 본 실험에서의 투과광 강도는 최

Table 1 Investigation of validity for the burnt gas temperature by two-color method.

$\tau_l$  = Local transmissivity       $\tau_{fa}$  = Mean transmissivity in observed region

Flame type		a	b	Characteristics
Detecting area $\phi = 10$ mm				
Conventional two-color method (Absolute value)		Impossible measurement	Possible measurement	
Modified two-color method (Relative value)	Expanded beam $\phi = 10$ mm	Impossible measurement	Possible measurement	It is adequate to measure the mean burnt gas temperature of type b.
	Beam $\phi = 8$ mm	Possible measurement $\tau_l = \text{uniform}$	Possible measurement $\tau_l = \tau_{fa}$	It is possible to measure the burnt gas temperature of type a.

고압력 직전부터 감소하고, 2파장의 자발광 강도는 시간적으로 투과광 강도의 감쇠와 거의 같게 나타나고 있다. 본 연구에서는 연소기의 특수성을 고려하여 적용범위가 넓은 변형 2색법을 채용하여 식 (4)에 의해 연소가스온도를 구했다.

### 3.3 연소가스온도에 미치는 당량비의 영향

Fig. 5에는 당량비 2.1의 경우에 있어서 예혼합기중 불활성가스 ( $N_2 + Ar$ )의 체적비율을 공기와 같은 72.7 %로 고정해서 Ar의 체적비율을 변화시킨 측정온도값을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 것처럼, 압력이 높을수록 연소가스의 단위면적당 열손실 비율이 감소하기 때문에 연소가스온도는 높아지고 있다. 또한, Ar의 체적비율을 증가시키면, 가스의 열용량이 저하하여 연소가스온도가 높아진다. 그런데 2색법은 광로중에 온도분포가 존재하는 경우에는 비교적 최고온도에 가까운 값이 측정될 수도 있다.<sup>16)</sup>

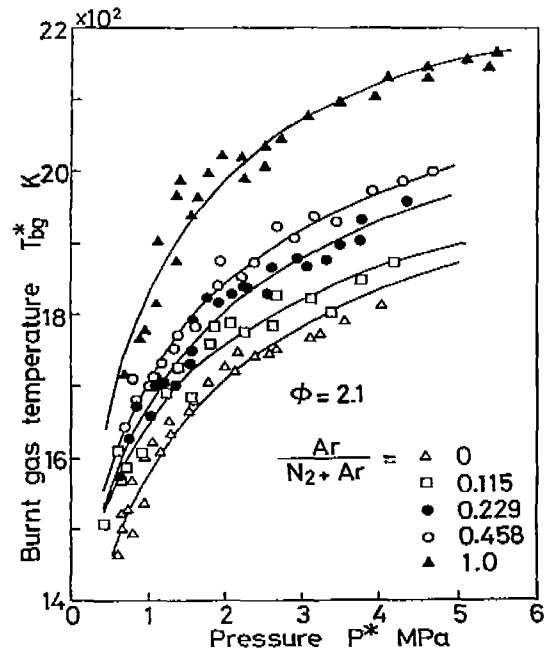


Fig. 5 Burnt gas temperature  $T_{bg}^*$  controlled by changing the volume fraction of argon in the Ar +  $N_2$  versus pressure  $P^*$  at equivalence ratio  $\phi = 2.1$



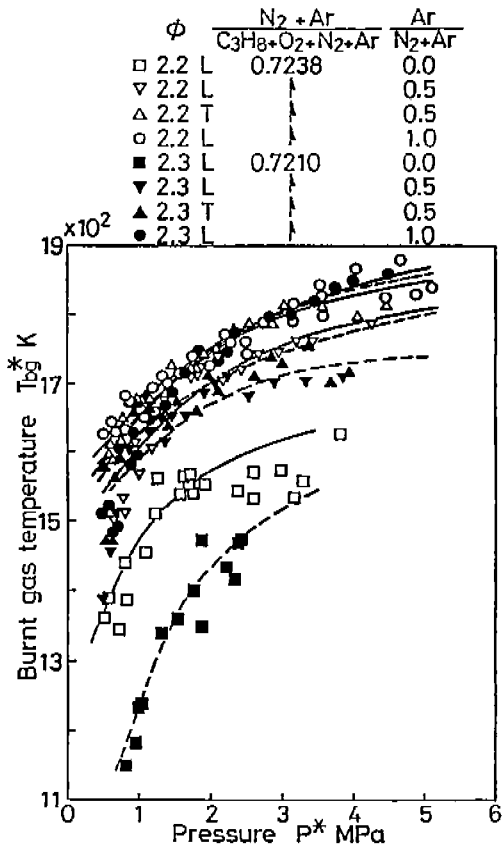


Fig. 6 Burnt gas temperature  $T_{bg}^*$  versus pressure  $P^*$  at equivalence ratio  $\phi = 2.2$  and 2.3

Fig. 6은 당량비 2.2 및 2.3일 경우에 대하여 당량비 2.1일 경우와 같은 방법으로 나타낸 것이다. 정성적인 경향은 Fig. 5의 경우와 같은데, 당량비 2.1일 경우보다 동조건에서 온도가 낮아짐을 알 수 있다.

Fig. 6에서 당량비를 나타내는 수치뒤에 L, T의 기호가 표시되어 있는데, 전자는 층류연소, 후자는 난류연소를 의미한다. 본 실험은 주로 층류연소에 대해서 이루어졌지만, 난류연소의 경우, 온도경계층의 두께가 얇아지리라 예상되므로, 연소기 내벽부근의 온도경계층에 의한 영향을 알아보기 위하여, 직경 50 mm, 높이 14 mm, 두께 2 mm의 원통에 대하여 직경 4 mm의 구멍이 27개 뚫인 난류발생기(구멍의

층면적비 15.4%)를 연소실내에 중심을 일치시켜 설치했다. 8개의 점파플러그에서 전파되어 온 층류화염이 다공원통의 내측으로 통과될 때 난류화염이 생성된다. 그 결과, 난류화염은 연소기간이 짧아진 만큼 연소가스온도가 층류연소에 비해 30 ~ 80 K 정도 높아지고 있다.

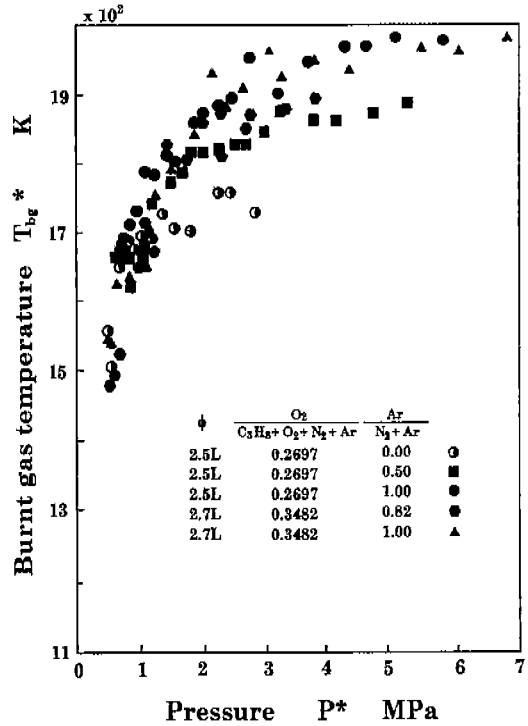


Fig. 7 Burnt gas temperature  $T_{bg}^*$  versus pressure  $P^*$  at equivalence ratio  $\phi = 2.5$  and 2.7

당량비가 큰 경우에는 매연이 많이 생성되어 매연입자의 복사에 주목한 2색법의 경우 온도 측정이 가능하지만, 연료량이 너무 많으면 가연 한계성 때문에 연소가 일어나지 않는다. Fig. 7의 당량비 2.5 및 2.7일 경우, 공기의 체적비율을 기준으로 하여 혼합기를 만들면 연료량의 과다로 인하여 연소가 일어나지 않으므로, 본 연구에서는 공기의 경우보다 산소의 체적비율을 증가시키고, 불활성가스중 질소 대신에 아르곤의 체적비율을 증가시켜 실험을 했

다. 당량비 2.5와 2.7의 경우에도 앞에서의 경우와 정성적으로 일치한데, 당량비가 클수록 불활성가스중 질소의 체적비율 감소와 산소 체적비율의 상대적인 증가로 인해 연소가스온도가 증가하고 있음을 그림에서 알 수 있다.

매연은 온도가 낮지 않으면 생성되지 않고, 또한 매연생성량이 적으면 자발광 강도가 약해서 2색법으로 온도를 구할 수가 없다. 당량비가 1.9 이하인 경우, 공기의 경우와 같은 산소의 체적비율에서는 매연이 거의 생성되지 않아 2색법에 의한 연소가스온도를 측정할 수 없으므로, 이러한 경우에 대해서는 공기의 경우보다 질소의 체적비율을 증가시켜서 매연생성 분위기를 조성하여 연소가스온도를 측정했다. 당량비의 범위가 1.5~1.9인 경우, 각 당량비에 있어서 질소의 체적비율을 단열화염온도가 거의 같게 되는 값을 기준으로 결정했다.

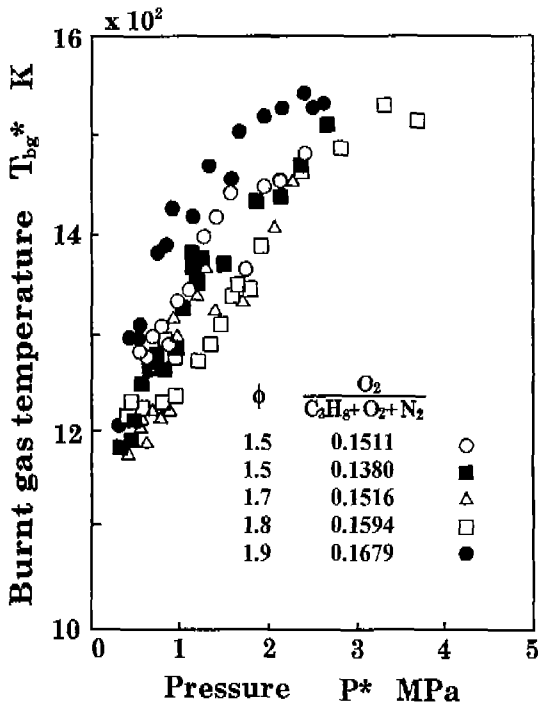


Fig. 8 Burnt gas temperature  $T_{bx}^*$  versus pressure  $P^*$  at equivalence ratio  $\phi = 1.5, 1.7, 1.8$  and  $1.9$

Fig. 8은 연소압력에 따른 실험결과를 나타내고 있는데, 당량비 범위가 1.5~1.9인 경우에도 앞의 경우와 정성적으로 일치하고 있다. 그런데 측정된 변형 2색법에 의한 연소가스온도는 대략 1170~1550 K 정도가 되고, 같은 압력 일지라도 당량비 및 산소의 체적농도에 따라 측정온도의 차이가 40~180 K 정도 된다. 이것은 당량비가 앞의 조건보다도 작을지라도 불활성가스중 질소의 체적비율이 증가하고 산소의 체적비율이 상대적으로 감소하였기 때문에, 연소가스온도가 낮아지고 있음을 알 수 있다. 또한 동당량비에서는 산소의 체적농도가 클수록 측정온도가 높음도 당량비 1.5에서 알 수 있다.

#### 4. 결 론

정적 연소기내 매연생성 분위기의 프로판-산소-불활성가스 예혼합기 연소에 있어서 변형 2색법에 대한 적용 가능성을 검토하여, 당량비가 1.5~2.7인 경우, 압력 0.1~7 MPa의 넓은 범위에 걸쳐서 연소가스온도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존 2색법에 의한 절대값과 변형 2색법에 의한 상대값의 측정온도와는 10~20 K 정도의 차이가 있지만, 국소 투과율이 관찰영역에서 균일하다면, 화염이 전관찰영역을 채우지 않아도 성립되는 변형 2색법에 의한 상대값 측정법의 정확도가 높다.
- 2) 당량비에 관계없이 동당량비에서는 압력이 높을수록 연소가스의 단위면적당 열손실 비율이 감소하기 때문에 연소가스온도는 높아지고, Ar의 체적비율을 증가시키면 가스의 열용량이 저하하기 때문에 연소가스온도는 높게 나타났다.
- 3) 당량비 2.2와 2.3에서 난류연소는 층류연소에 비하여 연소속도가 빨라진 만큼 열손실이 작아지기 때문에, 연소가스온도가 30~80 K 정도 높게 나타났다.

4) 당량비 1.9 이하 및 2.5 이상인 경우는 산소, 질소 혹은 아르곤의 체적비율을 변화시켜 매연생성 분위기를 조성하여 당량비의 영향에 따른 연소가스온도를 측정할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 동경공업대학 제어시스템공학과 에너지변환 연구실의 실험장치를 이용하여 수행하였고, 연구결과의 고찰에는 동대학 공학부장 카미모토(神本)교수의 조언이 많았음을 밝혀두며, 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. T. M. Dyer, and W. L. Flower, "A Phenomenological Description of Particulate Formation During Constant Volume Combustion", Particulate Carbon, Formation During Combustion, pp. 363~385, 1981.
2. 田坂 英紀, 松岡 信, 高野 正美, "定容容器內豫混合氣燃焼の基本的熱力學的モデル", 日本機械學會論文集(B編), 48卷, 435号, pp. 2355~2363, 1982.
3. M. T. Lim, R. W. Anderson, and V. S. Arpaci, "Prediction of Spark Kernel Development in Constant Volume Combustion", Combustion and Flame, Vol. 69, pp. 303 ~ 316, 1987.
4. M. W. Bae, and T. Kamimoto, "Soot Formation Rate in Premixed Combustion at High Pressures", The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Vol. 2513, pp. 463~471, 1995.
5. 小原 哲郎, 蔡 品, 吉橋 照夫, 大八木 重治, "定容容器內亂流火炎の研究", 第35回燃焼シンポジウム, pp. 151~153, 1997.
6. 浜本 嘉輔, 富田 榮二, 泉 政明, "密閉容器內燃料-空氣均一混合氣の燃焼に及ぼす旋回亂流の影響", 日本機械學會論文集(B編), 53卷, 488号, pp. 1395~1402, 1987.
7. 片岡 克己, 廣岡 重正, 角田 敏一, 深谷 信彦, "定容燃焼器を用いた天然ガスエンジンの燃焼特性に関する基礎的研究", 日本機械學會論文集(B編), 62卷, 596号, pp. 358~363, 1996.
8. 高橋 政嗣, 小川 英之, 藤原 康博, 宮本 登, "定容燃焼器における層狀ガス燃焼の舉動觀察と排氣特性", 第33回燃焼シンポジウム, pp. 304~306, 1995.
9. 渡邊 和憲, 小原 哲郎, 吉橋 照夫, 大八木 重治, "定容容器內伝ば火炎の研究(スワールの影響)", 第33回燃焼シンポジウム, pp. 526~528, 1995.
10. T. Kageyama, "Influence of Hydrodynamic Conditions on the Early Stage of the Development of Hydrocarbon-Air Premixed Flames in a Constant Volume Combustion Chamber", The Fourth International Symposium COMODIA 98, pp. 215~220, 1998.
11. 이창식, 김동수, 오군섭, "정적 연소실내의 메탄-공기 혼합기의 연소특성에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, 제4권, 제4호, pp. 201~209, 1996.
12. 김봉석, 이영재, "메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성(II)", 한국자동차공학회논문집, 제4권, 제3호, pp. 156~167, 1996.
13. 최수진, 전충환, 장영준, "밀폐 연소실 내의 메탄-공기 예혼합기의 연소 및 라디칼 특성에 관한 연구(II)", 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제5호, pp. 602~614, 1997.
14. 배명환, 이승규, "연소기관의 매연생성과

- 정 모델링용 고온·고압 정적연소장치의 성능에 관한 연구”, 한국자동차공학회논문집, 제7권, 제1호, pp. 20~30, 1999.
15. 裴明煥, 神本 武征, 小林 治樹, “定容豫混合氣燃焼におけるすす生成に関する研究”, 日本機械學會論文集(B編), 53卷, 493号, pp. 2884~2889, 1987.
  16. 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関する研究”, 日本機械學會論文集(第2部), 44卷, 337号, pp. 228~238, 1978.
  17. 裴明煥, “高壓下の豫混合氣燃焼におけるすす生成に関する研究”, 東京工業大學大學院 博士學位論文, 1989.
  18. 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.
  19. 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)”, *KSME Journal*, Vol. 8, No. 8, pp. 175~182, 1994.
  20. D. B. Olson, and J. C. Pickens, “The Effects of Molecular Structure on Soot Formation, I. Soot Thresholds in Premixed Flames”, *Combustion and Flame*, Vol. 57, pp. 199~208, 1984.
  21. 배명환, 이승규, 김성태, “정적 예혼합기 연소에 있어서 2영역 모델 및 2색법에 의한 연소온도 비교에 관한 연구”, 한국박용기관학회지, 투고중, 1999.
  22. R. C. Millikan, “Measurement of Particle and Gas Temperature in a Slightly Luminous Premixed Flame”, *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 51, No. 5, pp. 535~542, 1961.
  23. J. L. Delfau, P. Michaud, and A. Barrassin, “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.