

급속삽입법을 이용한 연료 유량에 따른 동축류 확산화염에서의 온도 측정에 관한 연구

한 용택*¹⁾ · 이 기 형²⁾

한양대학교 대학원¹⁾ · 한양대학교 기계공학과²⁾

A Study on the Co-flow Diffusion Flame Temperature Measurement at Various Fuel Flows Rate Using the Rapid Insertion Technique

Yongtaek Han*¹⁾ · Kihyung Lee²⁾

¹⁾Graduate School, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

(Received 12 May 2004 / Accepted 12 October 2004)

Abstract : Co-flow laminar diffusion flames' temperature has been studied experimentally for ethylene(C_2H_4) using a co-flow burner in order to investigate the characteristics of diffusion flame's temperature distribution. The temperature distributions in the flame were measured by rapid insertion of a R-type thermocouple. The measurement area was divided into three zones. Ist area was expect to created PAH zone, II nd area was expect to form soot zone, which is known to generate most soot volume fraction, and III rd area was expect to form soot oxidization zone. Also The temperature along the flame y-axis as a fuel quantity was measured. As a results, we have measured temperature neglecting the effect of soot particles attached to the thermocouple junction, which is close to the nozzle and upstream zone has a unstable flow in co-flow diffusion flame and acquires that the flame y-axis temperature has a uniform temperature in the generated soot volume fraction zone(II nd).

Key words : Diffusion flame(확산화염), Soot(매연), Rapid insertion technique(급속삽입법), Co-flow burner(동축류버너), PAH(다중고리 방향족 탄화수소)

1. 서론

확산화염이란 연료와 산화제가 서로 분리되어 존재하면서 화염면에서 확산 및 대류에 의하여 혼합된 후 반응하여 이루어지는 화염을 말하며 현대 산업사회에서 중요한 역할을 하고 있는 디젤엔진이나 가스터빈, 산업용 및 발전용과 같은 연소기기들은 확산화염을 이용하고 있다. 하지만 확산화염을 이용하는 연소기기의 특성상 매연의 생성은 불가피

하며 매연발생의 능동적인 제어를 위하여 그 생성 및 산화과정의 규명은 반드시 필요하다. 일반적으로 동축류 확산화염에서의 매연생성 및 산화의 특성은 매연입자의 체적분률, 수밀도, 평균직경 및 PAH 농도 측정을 통하여 분석되어진다. 이때 화염의 생성과 산화의 특성은 온도의 영향을 많이 받는다고 알려져 있다(Gülder, 1992).¹⁾ 따라서 매연생성/산화 특성에 관한 연구에는 화염의 온도가 고려되어야 하며, 확산화염의 온도 측정 장치로는 열전대(thermocouple), CARS(Coherent Anti-stokes Raman Spectroscopy), 복사온도계 등이 사용된다.

*To whom correspondence should be addressed.
rthan102@hanmail.net

이들 방법 중 열전대는 비교적 온도 측정이 쉽고, 적은 비용으로 측정을 할 수 있지만, 열전대 비드로부터 복사열손실, 열전대 선을 통한 전도열손실, 매연입자의 부착 등으로 인한 측정오차가 발생하게 된다. 현재 이의 해결방법으로 급속삽입법(rapid insertion technique)을 이용하고 있다. 그러나 화염이 밀폐된 용기의 내부에서 형성되는 경우에는 열전대를 이용한 화염온도측정이 불가능한 경우가 많게 된다.

CARS는 비접촉식 온도 측정 방법으로 고온에서 측정값의 신뢰도와 정확도가 매우 우수하다고 알려져 있으며, 용기내부에 있는 화염도 쉽게 측정할 수 있으나, 확산화염의 온도측정에는 C2라디칼 또는 매연입자의 존재에 따른 신호의 왜곡이 완전히 해결되지 않았으며, 특히 질소가 거의 없는 연료지역에서는 온도 측정에 어려움이 있게 된다. 또한 고가의 광학적 측정장치가 필요하고 신호 해석이 비교적 어려워 확산화염의 온도측정에 보편적으로 사용되기에는 많은 제약이 따른다고 알려져 있다. Moss et al.²⁾과 Handiquert et al.³⁾은 CARS를 이용하여 화염 내에서의 온도를 비교적 정확하게 측정하였다. 하지만 CARS를 이용한 화염 내 온도 측정 장치가 복잡하고 값이 비싸며, 매연 농도가 높은 화염에서의 온도 측정에서는 매연 입자에 의한 간섭의 문제를 완전히 해결하지 못한 상태라서 매연 농도가 높은 화염에서의 온도 측정에 사용하기에는 적절하지 않은 것으로 판단된다.

따라서 R-type의 열전대를 사용하여 화염 내부 온도를 측정하는 것이 일반적인데, 화염 내부의 온도 측정을 위해서 매연 생성이 많은 에틸렌 화염의 생성 영역에 열전대를 삽입하면, 열영동(Thermophoresis) 현상에 의해 매연 입자가 열전대 점점 부위에 급속히 달라붙어서 열전대의 점점으로부터의 복사 열손실이 크기 때문에 화염의 실제 기체 온도보다 열전대의 접점의 온도가 낮게 된다. 이러한 열전대를 이용한 온도 측정에서의 문제를 해결하기 위해, 본 실험에서는 열전대의 급속삽입법을 적용하여 열전대가 화염대를 통과하는 시간을 가능한 짧게 해서 온도 측정 위치 까지의 도달 경로 중에서의 매연입자 부착을 최소화하고, 또한 직경이 얇은

열전대를 사용하여 접점의 크기를 최소로 함으로써 기체 온도에 대한 추종성을 향상시켜서 매연입자가 많이 부착되기 전에 화염의 실제 온도에 가깝도록 온도 측정이 가능하다. 또한 급속 삽입 온도 측정에서는 화염 부근에서 열전대의 급격한 이송에 의해 일어나는 화염 자체에 대한 교섭을 최소화하도록 열전대만을 화염 내로 삽입한다.

Puri, Santoro et al.⁴⁾은 급속 삽입 온도 측정법⁵⁾을 도입해 열전대로 화염내 온도를 측정하였다. 그러나 열전대를 이용할 경우, 열전대의 비드로부터의 복사 열손실, 열전대 선을 통한 전도 열손실 뿐만 아니라, 매연 입자의 부착으로 인한 측정 오차를 배제하는 것이 해결하여야 하는 문제이다. Santoro et al.⁴⁾, Rosner et al. 등은 이러한 문제를 겪으며 여러 종류의 화염에 대해 열전대를 이용하여 온도 데이터를 얻어 왔다.

한편, 일반적으로 매연입자의 생성은 다음의 네 단계로 나뉜다. 첫째, 광범위한 열분해(pyrolysis)와 원자 재배열(rearrangement)을 통해서 핵(nuclei)이 형성되며(soot inception), 둘째로 이 핵에 아세틸렌 등의 화학종이 부착되는 표면성장(surface growth)을 통하여 체적분율(volume fraction)의 증가를 가져오고, 셋째로 미연 탄화수소가 고갈되어 더 이상의 입자성장은 없이 다른 입자와의 응집(coagulation)을 통하여 크기는 증가하고 수밀도(number density)의 감소를 가져오며, 마지막 단계로 O_2 , OH , O 등에 의해서 매연입자의 산화가 발생하게 된다고 알려져 있다.^{6,7)}

따라서 본 연구에서는 노즐에서 가까운 화염의 지역 즉 PAH 생성지역이라고 판단되는 부분, 또한 표면성장을 거쳐 soot의 체적분율이 가장 증가하리라 판단되는 매연생성 부분, 그리고 매연의 산화가 가장 활발한 지역이라고 예상되는 부분의 3가지 영역에서 화염 내부 온도를 측정하였고, 기존의 실험보다 정량적인 방법으로 보다 정확한 온도를 얻기 위해서 급속삽입기구를 고안하고 두께가 $60\mu\text{m}$ R-type 세선 열전대를 사용하여 동축류 확산 화염의 온도를 측정하였다.

또한 향후 본 연구결과를 토대로 동일한 동축류 확산화염에서의 soot의 체적분율을 측정할 계획이

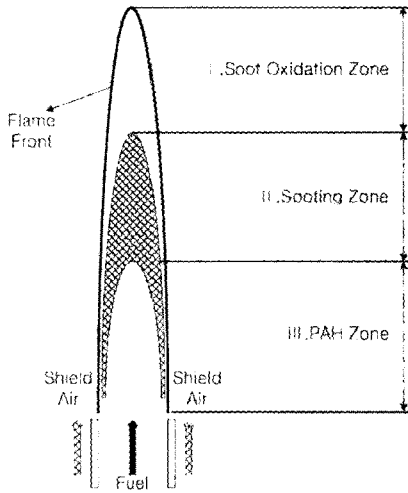


Fig. 1 Typical Co-flow diffusion flame

며, 연료에 따른 온도와 soot의 농도와와의 관계를 연구할 계획이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 동축류 버너 및 실험장치

동축류 버너의 연료는 C_2H_4 (에틸렌)를 사용하였고, 연료의 양은 180cc/min을 기준으로 140cc/min, 160cc/min, 180cc/min, 200cc/min, 220cc/min의 연료량을 사용하였다. 또한 사용된 버너의 구조는 Fig. 2

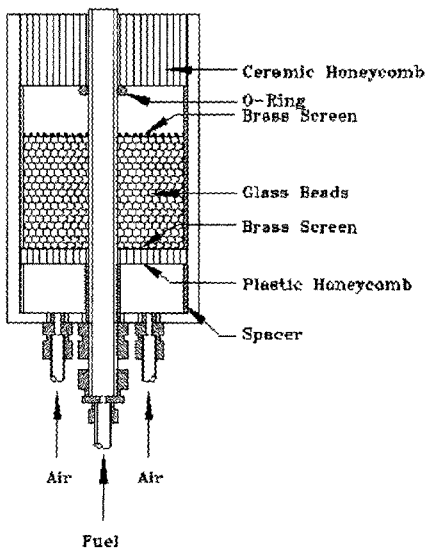


Fig. 2 Co-flow burner

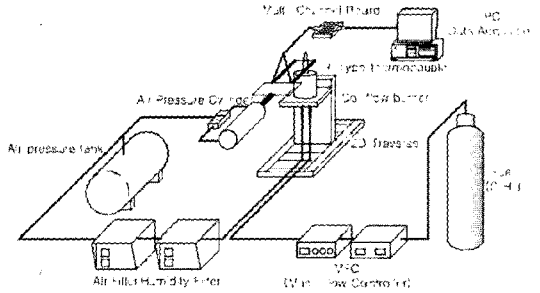


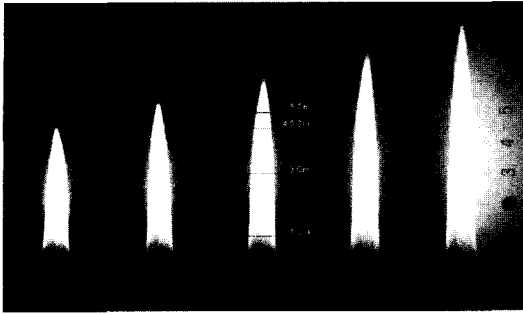
Fig. 3 Experimental setup

와 같다. 연료는 버너의 중심에 위치한 내경 8.0mm, 외경 9.3mm의 황동 노즐을 통하여 공급하였으며 외부로부터의 간섭에 의하여 화염의 떨림이나 변형이 일어나지 않게 하기 위한 과도 충류공기(over-ventilated shield air)를 공급하였다. 이러한 과도 충류공기는 직경 2.5mm의 유리구슬, 황동 스크린 및 플라스틱, 세라믹 하니콤을 사용한 장치를 버너주위에 장치하여 출구속도장이 균일한 주위공기를 공급하였고 이를 통하여 실험 과정에 있어서 동일하며 안정적인 과도 공기 충류 확산화염을 얻어낼 수 있었다.

Fig. 3은 전체 실험장치의 개략도로서, 연료 및 유량 공급부를 포함한 동축류 버너, 급속 삽입 온도 측정 장치, A/D 보드와 연결된 데이터 처리용 PC로 구성되어 있다.

본 실험에서는 고온에서의 온도 측정이 가능한 R-type(Pt-Pt/13%Rd) 열전대를 사용하였으며, 급격한 온도 변화에 민감하게 따라갈 수 있도록 직경 60 μ m의 세선(fine wire)을 선택하였다. 버너는 X-Z방향으로 움직이는 이송 장치 위에 설치되어 있으므로 화염의 반경 방향 및 높이 방향의 정확한 지점에서의 온도 측정이 가능하였다.

Fig. 4의 그림은 연료의 양에 따른 온도분포를 파악하기 위해서 연료의 양을 200cc씩 변화시킨 140cc/min, 160cc/min, 180cc/min, 200cc/min, 220cc/min의 실제 확산화염의 모양을 나타내는 것으로서 안정적인 동축류 확산화염을 얻을 수 있었다. 또한 실험조건은 180cc/min에서 PAH 지역, 매연생성지역, 매연산화지역으로 구분을 두었으며, 매연산화지역에서는 충류공기의 영향이 충분히 미치지 않아 정상상태로 남아있지 않으므로 한 개의 실험조건을



(a) 140 (b) 160 (c) 180 (d) 200 (e) 220cc/min
 Fig. 4 Flame shape with fuel flow rates

추가하여 신뢰성을 높일 수 있었다. 180cc/min에서 1cm, 3cm, 4.5cm, 5cm의 횡축방향으로 열전대를 0.2mm 간격으로 측정하여 실험하였으며 나머지 연료량에서의 실험조건들을 정리하면 Table1과 같다.

Table 1 Experimental conditions

cc/m cm	140	160	180	200	220
1 st	0.778	0.889	1	1.11	1.22
2 nd	2.33	2.667	3	3.33	3.667
3 rd	3.5	4	4.5	5	5.5
4 th	3.889	4.44	5	5.55	6.11

2.2 온도 데이터 분석 및 처리

각각의 측정점의 raw 데이터(voltage history)를 비교 분석하여 설정한 열전대의 전형적인 응답특성을 Fig. 4에 나타내었다. 버너 팁에서(height above burner, H.A.B.=30mm)에서의 온도를 반경방향에 따라 보여주고 있으며, Fig. 5(a),(b),(c),(d) 네 개의 그래프는 열전대의 전압신호의 특성을 파악한 대표적인 데이터의 형식이다. 열전대의 삽입은 약 0.7초 동안 이루어지며 공압 실린더를 이용하여 화염내에 전진 속도는 15cm/s로 측정위치로 이동하였으며, 솔레노이드밸브와 공압실린더에 의한 후퇴속도는 19.23 cm/s 이다.

Fig. 5(a)의 경우에는 매우 안정된 상태의 데이터로서 표준상태의 데이터신호로 판단될 수 있다.

(b)의 경우에는 버너노즐에서 매우 가까운 영역에서 얻은 데이터로서 유동의 영향과 열분해가 아직 이루어지기 전에 불안정한 화염초기 상태로서의 데이터로서 유동의 영향과 열분해가 아직 이루어지

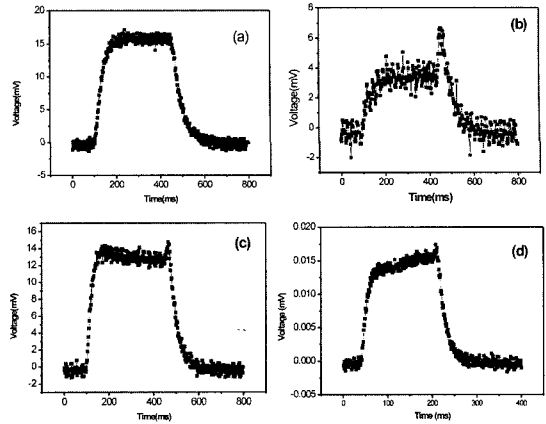


Fig. 5 Characteristics of temperature measurement system

기 전에 불안정한 화염초기 상태로서의 데이터로서 신호의 진행이 매우 불안정한 상태임을 알 수 있다.

한편(C)의 경우에는 열전대가 화염안으로 삽입된 이후 온도가 최고를 보이고 이후 감소하는데, 이것은 열전대의 접점에 달라붙은 매연입자에 의한 복사열손실로 보인다.

(d)의 경우에는 200~400ms에 걸쳐 온도가 미세하게 오르는 경향을 보이다가 떨어진다. 이러한 경우는 열전대의 접점이 화염대 내부에 있을 때 양쪽의 열전대 선이 화염대에 닿아서 화염대로부터 열전도에 의해 접점의 온도가 조금씩 상승하는 것으로 생각된다.

위의 온도 그래프 형태로부터 접점이 목표점에 도달한 직후부터 매연이 부착하기 전에 최고치를 얻어야 준 정상상태(quasi-steady state)에서 온도를 읽었다고 할 수 있다.⁸⁾

그래프의 네 가지 패턴에 대해, 얻은 온도가 목표점에 도달한 직후, 얼마 후에 나타나는지 조사한 결과, 네 가지 경우 모두 최고치는 목표점에 도달한 후 150ms 이내에 나타났다. 그래서 네 가지 경우에 대해 일관성을 두기 위해 온도를 읽은 방법은 대략 열전대의 접점이 목표점에 도달 후 100~200ms 범위에 위치한 온도데이터의 평균값으로 하였다. 유효 값이라고 인정할 수 있는 범위, 즉 매연 부착이 본격적으로 시작하기 전에 값을 얻었으므로 기존의 측정보다는 실제 화염 온도에 보다 가까운 값이라고 생각된다.

2.3 복사 열손실 보상

측정된 온도는 열전대의 접점의 온도이므로 복사 열손실, 유도선을 통한 전도 열손실, 열전대의 접점 표면에서 일어나는 열생성(heat generation)등을 고려해 가스의 온도를 구해야 한다. 그러나 본 실험에 세 태한 열전대 선의 직경이 매우 작아서 접점의 직경은 $120 \pm 25 \mu\text{m}$ 이므로 전도 열전달과 표면에서의 열 생성은 접점에서 복사열손실에 비해 충분히 작으므로 복사 열손실만을 고려하였다. 접점에서 준정상 에너지 평형(quasi-steady energy balance)을 적용하면 다음과 같이 측정된 T_j 값으로부터 실제 화염 온도 T_g 값을 얻을 수 있다.

$$\epsilon_j \sigma T_j^4 = (\chi_{g,o} N_j / 2d_j) (T_g^2 - T_j^2)$$

여기서 ϵ_j 는 접점의 방사율(emissivity), σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, N_j 는 접점의 Nusselt 수, d_j 는 접점의 대표지름, 그리고 $\chi_{g,o} = \chi_g / T_g$ 이다. 여기서 χ_g 는 가스의 열전도계수로, T_g 에 선형적으로 비례한다고 가정하여, $\chi_{g,o}$ 값을 상수로 하였으므로, χ_g 가 상수라는 가정보다는 훨씬 합리적이다. 이 식의 좌변은 단위 면적 당 복사 열손실량이며 우변은 대류 열 유입량이다. $N_j = 2.1$, $\chi_{g,o} = 6.54 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2\text{K}$, $d_j = 160 \mu\text{m}$ 를 적용하였다. 방사율 ϵ_j 는 백금(Pt)의 깨끗한 표면에 대한 값을 취했으며, 온도에 따라 편차가 심해 Fig. 6에서 보듯이 온도마다 각기 다른 값을 주어 값을 구하였다.^{10,11)} 온도가 높을수록 복사 보정에 의한 온도 차이가 커져서, 2000K에서는 보정 온도 차이는 약 123K로 나타난다.

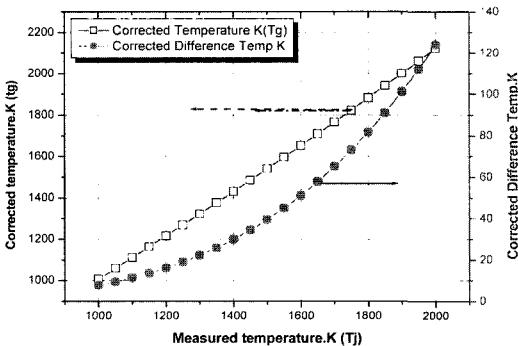


Fig. 6 Corrected temperature and the difference

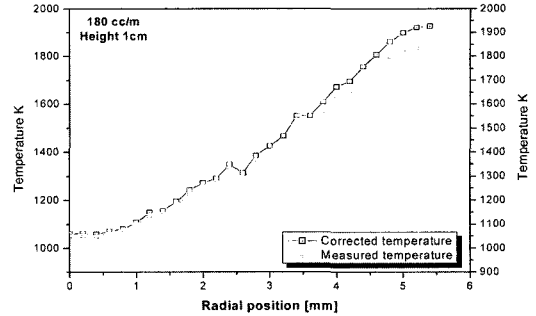


Fig. 7 180cc/min, at the height of 1cm measured temperature and corrected temperature

Fig. 7의 그림은 연료량이 180cc/min이고 1st 지역에서 화염높이 1cm에서의 측정결과로서 열전대로 측정된 결과의 높이보다 복사열손실을 고려하면 약 100K정도 상승된 보정된 온도값을 얻을 수 있었다.

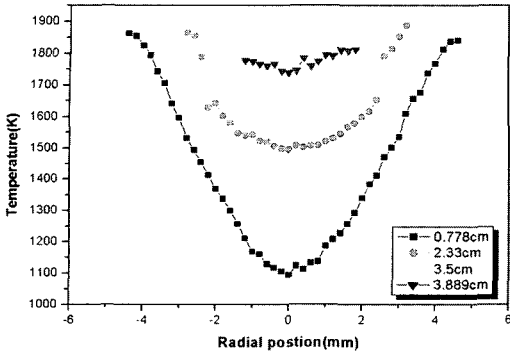
3. 실험 결과

실험에 사용한 연료유량은 140, 160, 180, 200, 220cc/min 이고 과도 층류 공기를 외부로 공급하여 동축류 확산화염을 제작하여 열분해 및 PAH가 생성되는 지역(I), 매연생성이 가장 활발한 지역(II), 산화가 가장 활발한 지역(III), 위와 같이 3가지 영역을 구분하였고, 또한 산화가 가장 활발한 지역(III)에서는 정상상태가 되지 못한 약간은 불안정한 상태가 되는 지역이라고 판단되어 약간의 높이 차이를 두어 2회 측정하였다.

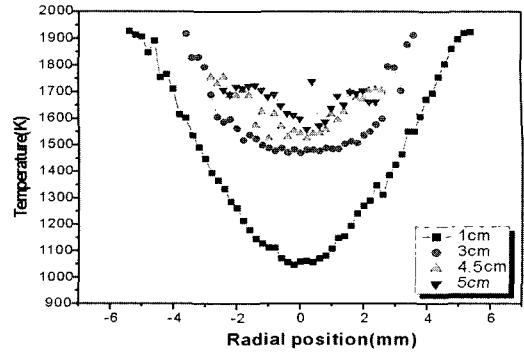
또한 측정한 화염의 위치는 반경방향으로 I, II, III의 영역과 또한 연료량에 따라 종축방향으로 1mm 간격으로 동축류 버너 노즐 약 3~4mm에서부터 화염 끝까지 측정하여 온도 분포를 파악하였다.

3.1 높이별 반경방향 온도

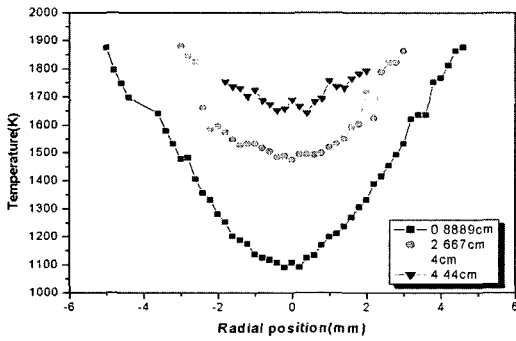
Fig. 8의 그림(a)~(e)는 각각 140cc/min, 160cc/min, 180cc/min, 200cc/min, 220cc/min의 I, II, III의 지역에서의 온도 측정 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 실험 측정된 화염의 위치는 반경방향으로 I, II, III의 영역과 또한 연료량에 따라 종축방향으로 1mm 간격으로 동축류 버너 노즐 약 3~4mm에서부터 화염 끝까지 측정하여 온도 분포를 파악하였다. 그림에서 알 수 있듯이 화염의 중심 부분에서 화염의 온도가



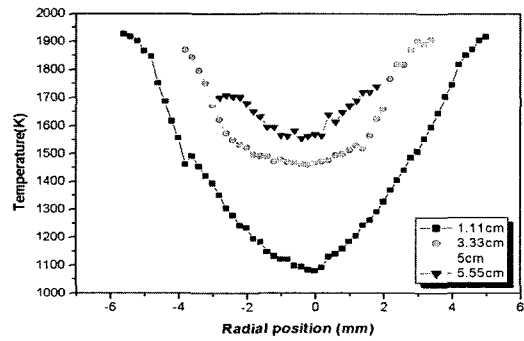
(a) 140cc/min fuel quantity



(c) 180cc/min fuel quantity



(b) 160cc/min fuel quantity

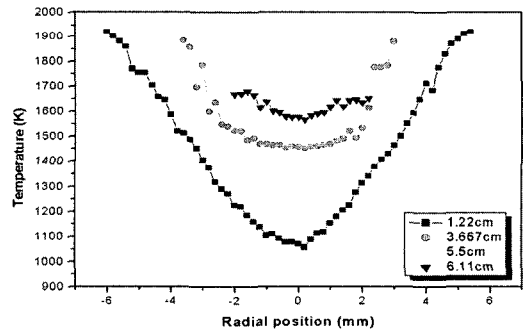


(d) 200cc/min fuel quantity

가장 낮은걸 알 수 있고, 화염면으로 가까워짐에 따라 온도가 상승하는 것을 알 수 있으며 최고 온도는 화염면에서 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 화염의 중앙부분에서도 높이가 올라 갈수록 화염의 온도도 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 III 영역에서는 온도 측정 결과 약간은 불안정한 상태임을 알 수 있었다. 이러한 결과로 동축류 확산화염의 상류부분에서의 화염상태는 정상상태이기 보다는 약간은 불안정한 영역임을 알 수 있다. 160cc/min과 180cc/min의 측정 온도에서는 화염선단(wing tip)의 현상이 나타남에 따라 온도 측정시에도 이러한 현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 연료유량의 변화량에 따른 온도 분포를 살펴보면 연료유량이 증가하여도 정상상태에서의 동축류 확산화염에서의 온도분포는 거의 일정한 경향을 보인다는 것을 알 수 있다.

3.2 구간별 반경방향 온도

Fig. 9의 그림은 연료량에 따라 구간 I, II, III 에 따라 온도 측정의 결과를 보여주는 그림으로서 구간



(e) 220cc/min fuel quantity

Fig. 8 Radial temperature profiles of the C_{2H_4} diffusion flame measured by thermocouple

III에서는 화염의 불안정성으로 약간의 높이 차이를 두어 (c)와 (d)와 같이 두개의 구간에서 III영역의 온도를 측정하였다. 구간 I영역에서는 매우 안정적이며, 또한 연료량의 변화에 따라서 일정한 온도의 경향을 보는 것을 알 수 있으며, 연료량이 많아짐에 따라 측정영역이 조금씩 넓어지며, 화염면에서의 온도 또한 연료량의 증가에 따라 온도도 조금 높아지는 경향을 볼 수 있다.

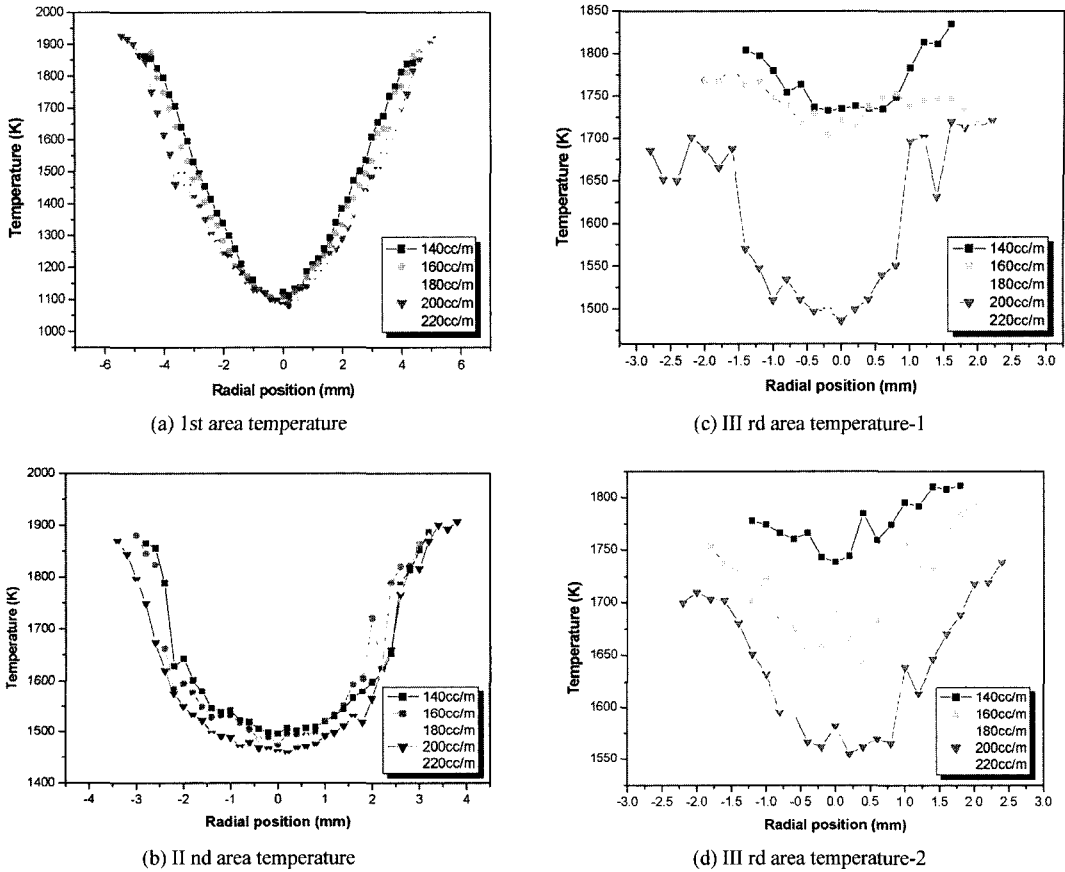


Fig. 9 The temperature by area's of the C_2H_4 diffusion flame measured by thermocouple

구간 II 영역에서는 구간 I 보다는 안정적이지 않지만 안정적인 상태의 온도분포를 보여주고 있으며, 화염중앙부분에서는 연료량이 많아짐에 따라 온도가 오히려 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이는 연료의 열분해가 연료가 작은 확산 화염일 때 더욱 활발해짐에 따라 온도가 조금 더 높은 것으로 판단된다.

또한 구간 III의 영역에서는 매우 불안정한 데이터의 확보가 이루어졌으며, 이는 동축류 확산화염의 경우 화염 하류부분에서는 불안정한 상태를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 화염 가운데 부분에서는 연료량이 적을 때 온도가 높은 경향을 보이고 있는데 이는 화염이 작을수록 산화가 활발하는 것으로 판단되며, 이러한 경향은 (c)보다 (d)의 그림에서 더욱 확실히 알 수 있으며 연료의 분출되는 축방향 모멘텀 보다 반경방향의 확산효과가 크기 때문이라

판단된다.

3.3 종축방향 측정온도

Fig. 10은 연료량에 따라 확산화염의 중심축을 따라 y축 방향으로 1mm간격으로 측정한 온도의 결과를 나타내는 그림으로서, 노즐에서 3~4mm높이에서 화염의 끝까지의 온도 분포를 나타낸 그림이다.

그림에서 알 수 있듯이 구간 I 영역에서는 온도의 급격한 상승이 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 연료의 급격한 열분해로 인해서 화염이 발달하는 과정으로 알 수 있다. 또한 PAH에서 매연이 발달하는 과정으로서 급격한 열의 상승이 나타나는 것을 알 수 있으며, 구간 II 영역으로 대표될 수 있는 중간부 위에서는 매연이 양이 가장 많은 지역으로서 온도의 변화가 거의 일정한 것을 알 수 있는데, 이는 매연이 일단 왕성하게 생성되고 산화되기 전의 영역

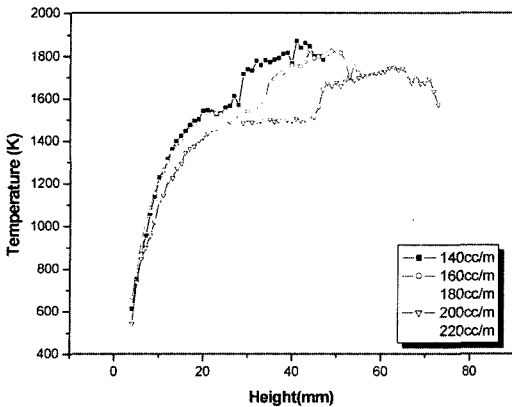


Fig. 10 Temperature with height above burner

에서는 y 축방향으로 중앙부위에서의 온도의 변화가 거의 없음을 발견 할 수 있었다. 또한 영역 III에서는 화염의 산화가 활발한 지역으로 화염의 높이가 높아짐에 따라 산화가 활발히 이루어짐을 알 수 있으며, 온도가 정상에서 내려가는 지역에서는 확산화염의 지역을 벗어나 측정된 것임을 알 수 있다.

또한 연료가 많아짐에 따라 온도가 내려가는 경향을 볼 수 있는데, 이는 연료의 양이 많아짐에 따라 매연에 의한 복사 열손실량이 많아짐에 따라 화염의 온도가 내려가는 것을 알 수 있다.

4. 결론

급속 삽입 기법을 이용하여 층류 동축류 확산화염에서의 연료량의 변화에 따라 횡축 방향과 종축 방향으로 R-type 열전대를 사용하여 온도 측정에 관한 연구를 통하여 다음을 알 수 있었다.

- 1) 복사 열손실을 보정하여 실제 화염의 온도를 확보하는 과정에서 측정온도가 약 2000K에서는 보정온도 차이는 약 123K 정도가 나타남을 알 수 있었다.
- 2) 동축류 확산화염에서 PAH가 생성되어 열분해가 일어나는 지역과 매연이 많이 생성되리라 예상되는 지역에서는 비교적 안정적인 온도를 확보 할 수 있었으며, 노즐 부위와 화염 상단에서는 불안정한 상태의 화염의 진행이 발생한다는 것을 알 수 있었다.
- 3) 높이별 반경방향의 온도 측정시, 연료유량의 변

화량에 따른 온도분포를 살펴보면 연료유량이 증가하여도 정상상태에서의 동축류 확산화염에서의 온도분포는 거의 일정한 경향을 보인다는 것을 알 수 있었다.

- 4) 연료량의 변화에 따른 화염의 중심을 기준으로 y 축방향으로 온도 측정시 PAH가 생성되리라 예상되는 지역과 매연의 산화가 이루어지는 영역에서는 온도의 상승이 일어남을 볼 수 있었으며, 매연이 제일 많이 생성되리라 예상되는 지역에서는 온도가 일정함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단에서 시행한 에너지 기술 학술 진흥 사업[2003-E-TR03-P-01-0-000-2003]의 지원에 의하여 수행된 연구 결과의 일부로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) O. L. Gülder, "Soot Formation in Laminar Diffusion Flames at Elevated Temperatures," *Combustion and Flame*, Vol.88, pp.74-82, 1992.
- 2) J. B. Moss, C. D. Stewart and K. S. Young, "Modelling Soot Formation and Burnout in a High Temperature Laminar Diffusion Flame Burning Under Oxygen-Enriched Conditions," *Combustion and Flame*, Vol.101, pp.491-500, 1995.
- 3) M. Haudiquert and A. Cessou, "OH and Soot Concentration Measurements in a High-Temperature Laminar Diffusion Flame," *Combustion and Flame*, Vol.111, pp.338-349, 1997.
- 4) R. J. Santor, T. T. Horvath and H. G. Semerjian, "The Transparent and Growth of Soot Particles in Laminar Diffusion Flames," *Combustion Science and Technology*, Vol.53, pp.89-115, 1984.
- 5) J. H. Kent and H. G. Wangner, "Why Do Diffusion Flames Emit Smokes?" *Combustion Science and Technology*, Vol.41, p.245, 1984.
- 6) B. S. Haynes and H. G. Wagner, "Soot Formation," *Prog. Energy Combustion Sci.*, Vol.7,

- pp.229-273, 1981.
- 7) O. I. Smith, "Fundamentals of Soot Formation in Flames with Application to Diesel Engine Particle Emission," Prog. Energy Combustion Sci., Vol.7, pp.275-291, 1981.
 - 8) D. E. Rosner, Transport Processes in Chemically Reacting Flow Systems, Butterworths, London, 1986.
 - 9) J. P. Holman, Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, 1990.
 - 10) J. C. Park, K. H. Kang and C. P. Park, Temperature, Korea Research Institute of Standards and Science, pp.105-208, Korea, 1985.