

급속 삽입법에 의한 화염 내부 온도 분포 측정

이교우**, 정영록*, 정종수**

Temperature Measurement in Concentric Diffusion Flames by Rapid Insertion Technique

Gyo-Woo Lee, Young-Rok Chung and Jong-Soo Jung

Key Words: Rapid Insertion Technique(급속 삽입법), Double-concentric Diffusion Flame(이중 확산 화염), Inverse Diffusion Flame(역확산 화염), Soot Deposition(매연 부착), Soot Volume Fraction(매연 체적 분율)

Abstract

The effect of temperature distributions on soot volume fraction in double-concentric diffusion flames have been investigated experimentally. Using fine thermocouple wires and a rapid insertion mechanism, we have measured temperature without the effect of soot particles attached to the thermocouple junction, which can lower the temperature signal about 100 K by increasing the heat loss from the junction by radiation. The temperature at the flame axis is higher in the double-concentric diffusion flames than in normal co-flow diffusion flames because of the inverse diffusion flame. However, it is almost the same as that at the periphery of normal flames, on which the inverse flame does not have an effect. Thus, the lower soot concentration found in the double-concentric diffusion flame can be explained by the effect of nitrogen diffusion from the central air jet.

1. 서론

화염 내의 매연 입자의 생성 메커니즘을 규명하고자 하는 연구들이 최근 들어 활발히 이루어지고 있으며 종전의 연구들이 대부분 정상 동축 확산화염(normal co-flow diffusion flame) 내에서의 매연 생성 기구에 초점을 맞추어 연구해 온

데 반해서 최근에는 역 확산화염(inverse diffusion flame) 및 이중 동축 확산화염(double-concentric diffusion flame)에 대한 연구를 통해 매연 생성 기구를 심층적으로 분석하기 위한 연구도 활발하게 이루어지고 있다.

본 연구실에서는 중앙의 산화제로 공기를 사용한 이중 동축 확산에 대한 일련의 연구를 수행하여 왔다. 이 연구들 중에 참고문헌 [1]의 연구 결과로부터는 이중 확산화염에서는 정상 확산화염보다

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 한국과학기술연구원(KIST)

화염의 내부에서는 화염 내부의 역 확산 화염의 영향으로 매연 입자의 생성이 빨리 시작되고 매연 농도도 높지만, 화염 외곽의 매연 생성 영역에서는 중앙의 공기로부터 확산된 질소의 영향으로 동일한 위치에서 연료의 농도가 상대적으로 낮으므로 매연 입자의 생성 및 성장이 빠르지 않고 매연 입자의 평균 직경도 작은 것으로 보고하였다.[1]

한편 이교우 등[2]은 광 산란-감쇠법 (Light scattering-extinction method)을 이용하여 화염 내부의 매연 농도 분포를 측정하고 산란광의 강도를 측정하여 정상 확산화염과 이중 확산화염의 매연 생성 기구를 비교하여 연구를 수행하였으며, 참고문헌 [1]에서 매연 농도 분포의 차이가 나타나는 원인을 규명하기 위해 화염 내의 온도 분포를 열전대의 급속 삽입법 (Rapid Insertion Technique)을 통하여 측정하여 그 결과를 비교하여, 예상한 대로 역 확산화염의 중심부에서의 온도가 정상 화염에서보다 상당히 높은 반면 화염 외곽의 화염대 부근에서의 온도에는 거의 차이가 없다는 연구 결과를 발표하였다. 그러나 이 논문에서의 화염 내에서의 온도 측정 결과는 예상보다 낮으며, 매연 농도가 높은 위치에서는 매연 입자의 부착이 측정에 미치는 영향을 충분히 제거하지 못한 것으로 생각된다.

Moss et al.[3]과 Haudiquert et al.[4]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, 이 경우에는 매연 입자의 열영동 현상에 의해 열전대 주위에 입자가 부착되기 때문에 정확한 온도를 측정하기 위해서는 상당한 주의가 필요하다.

Puri, Santoro et al.[5, 6]은 급속 삽입 온도 측정법[7]을 도입해 열전대로 화염 내 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 해결하

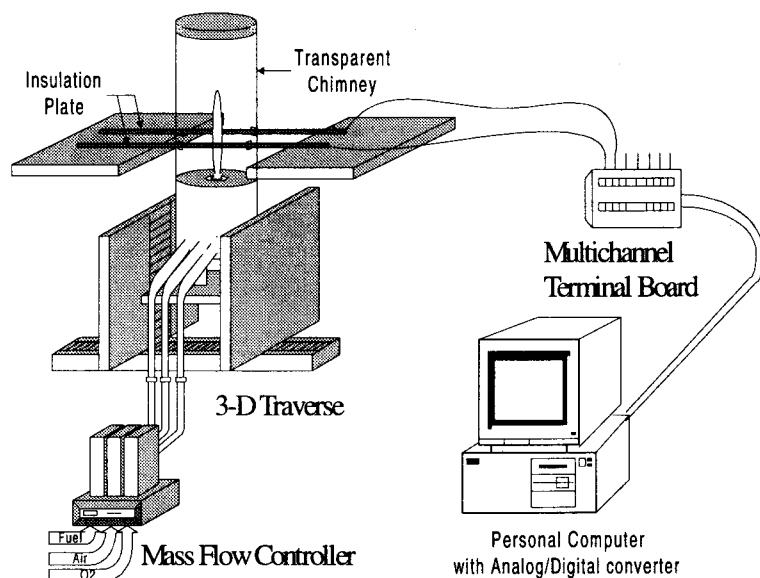


Fig. 1 Experimental setup for measuring temperature

여야 하는 문제이다. Santoro et al.[6], Rosner et al.[8], 김 상수 등[9]은 이런 문제를 겪으며 여러 종류의 화염에 대해 열전대를 이용하여 온도 데이터를 얻어왔다.

본 연구에서는 화염 내부 온도를 정확하게 측정하여 화염 내부의 매연 농도와 상관 관계를 얻기 위한 목적으로, 기존의 실험보다 정량적으로 보다 정확한 온도를 얻기 위해서 급속 삽입 기구를 고안하고 세션 열전대를 사용하여 온도를 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험 장치는 연료 및 유량 공급부를 포함한 동축류 버너, 급속 삽입 온도 측정 장치, A/D 보드와 연결된 데이터 처리용 PC로 구성되어 있으며 Fig. 1 은 실험 장치의 개략도이다. 동축류 버너는 삼중 동심관형 버너이며[1,2] 관의 내경은 각각 8 mm, 18 mm, 및 86 mm 이다. 중심부로부터 산화제(공기 또는 산소), 연료, 공기가 각각 공급되는 방식이다. 급속 삽입 온도 측정 장치는 화염 내로 삽입되는 열전대, 화염 외부에서 열전대를 지지하는 절연판, 절연판의 신속한

전, 후진 구동을 위해 사용한 솔레노이드로 구성되어 있다.

본 실험에서는 고온에서의 온도 측정이 가능한 R-type(Pt-Pt/13%Rd) 열전대를 사용하였으며, 급격한 온도 변화에 민감하게 따라갈 수 있도록 직경 50 μm 의 세션(fine wire)을 선택하였다. 열전대는 절연판을 거쳐 화염 외부의 연장 동(銅)선과 연결되어 있고, 연장 동선의 다른 끝을 다채널 터미널 보드에 연결하여 증폭기(Amplifier)가 내장 방식의 A/D보드(PCL-818HG)로 온도 기전력 신호가 전달된다. 채널의 증폭기를 통해 100 배로 증폭된 기전력 신호를 PC로 처리하여 온도 데이터를 얻는다. 구동용 솔레노이드는 압력 0.5 kgf/cm^2 로 절연판을 약 13 mm 정도 전, 후진시켜 열전대를 화염 내로 급속히 삽입할 수 있다. 버너는 X-Y-Z방향으로 움직이는 이송 장치 위에 설치되어 있으므로 화염의 반경 방향 및 높이 방향의 정확한 지점에서의 온도 측정이 가능하다.

화염 내부의 온도 측정을 위해서 매연 생성이 많은 에틸렌 화염의 매연 생성 영역에 열전대를 삽입하면, 열영동(Thermophoresis) 현상[10]에 의해 매연 입자가 열전대 접점 부위에 급속히 달라붙어서 열전대의 접점으로부터의 복사 열손실이 크기 때문에 화염의 실제 기체 온도보다 열전대의 접점의 온도가 낮게 된다. 이러한 열전대를 이용한 온도 측정에서의 문제를 해결하기 위해, 본 실험에서는 열전대의 급속 삽입법을 적용하여 열전대가 화염대를 통과하는 시간을 가능한 한 짧게 해서 온도 측정 위치까지의 도달 경로 중에서의 매연입자 부착을 최소화하고, 또한 직경 50 μm 의 가는 열전대를 사용하여 접점의 크기를 최소로 함으로써 기체 온도에 대한 추종성

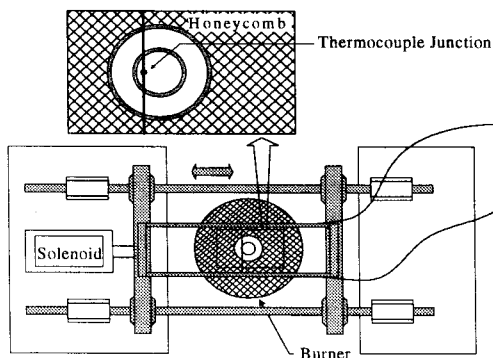


Fig. 2 Top view of the rapid insertion system

을 향상시켜서 매연 입자가 많이 부착되기 전에 화염의 실제 온도에 가깝도록 온도 측정이 가능하다. 급속 삽입 온도 측정에서는 화염 부근에서 열전대의 급격한 이송에 의해 일어나는 화염 자체에 대한 교란을 최소화하도록 열전대만을 화염 내로 삽입하였고 외기의 영향을 최소화하기 위해 외부에 연돌(Chimney)을 설치한 Fig. 2의 실험 장치를 설계하였다.

본 실험의 대상인 세 종류의 화염들은 공통적으로 가운데 환형 노즐(내경 10 - 18 mm)에 200 cc/min의 에틸렌을 주입하였으며 중심 노즐(내경 8 mm)에서 산화제로 250 cc/min의 공기를 주입한 이중동축 확산 화염(double-concentric diffusion flame, 이하 약칭 DDF), 산화제로 50 cc/min의 산소를 주입한 O₂DDF, 산화제를 주입하지 않은 정상 확산 화염(normal diffusion flame, NDF)의 세 종류의 화염에 대해서 실험을 수행하였다. 온도 데이터는 초당 1,000개의 샘플링 속도로 데이터를 1 초간 얻었으며 데이터를 얻는 동안 열전대를 화염 내로 삽입하고 열전대의 화염 내 체류시간은 10초 이내가 되도록 하였다. 매 측정마다 열전대의 접점에 부착된 매연 입자를 화염의 산화영역에서 산화시켜 제거하고 실험을 수행하였다. 그리고 매연 체적 분율은 4 W Ar-Ion Laser(파장 514.5 nm)를 사용하여 측정하였다.[2] 세 화염에 대해 온도 측정과 동일한 높이에서 광 감쇠법(Light Extinction)을 적용하여 매연 농도 분포를 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 열전대의 특성 반응

시간에 따른 온도 변동 그래프

(Temperature history)는 화염 내 열전대의 위치에 따라서 크게 3 가지로 구분된다. DDF의 높이 30 mm에서 세 측정점에서 1초 동안 얻은 온도 데이터는 Fig. 3와 같다. Fig. 3-(a)의 경우는 전형적인 형태의 온도-시간 그래프인데, 이 경우에 해당하는 열전대 측정점의 위치는 중심축부터 화염대 안쪽인 반경 방향 3 mm 지점까지이다. 이 경우에는 열전대가 화염에 삽입된 후 온도가 급속히 상승하여 피크를 보이고 이후 서서히 감소하는 형태를 보이는데, 이러한 현상은 열전대의 접점에 열영동 현상에 의해 화염 내부의 매연 입자가 달라붙음에 따라 접점이 커져서 복사 열손실이 증가하기 때문이다. Fig. 3-(b)의 경우는 열전대가 삽입된 후 급속히 상승한 후에도 다시 서서히 온도가 상승하는 형태를 보인다. 온도-시간 곡선이 꺾인 후에도 온도는 300 ~ 400 ms에 걸쳐 대략 100 ~ 150 °C 정도 상승한다. 반경 방향으로 최고 온도가 나타나는 위치(화염대) 안쪽 2 mm 지점부터 화염대까지 이러한 형태의 곡선이 나타난다. Fig. 2의 상단 그림에서 알 수 있지만 열전대 접점이 화염대 내부에 있을 때에는 열전대 선 양쪽 부분이 화염대에 닿게 되므로 고온의 화염대로부터 점점으로의 열전도에 의해 접점의 온도가 서서히 상승하기 때문에 이 형태의 곡선을 나타내는 것이다. Fig. 3-(c)의 형태의 온도-시간 곡선은 화염대 바깥쪽의 측정점에서 나타나는데 (a)의 경우와 유사하게 피크가 나타난 후 온도가 하강하는데 측정점의 위치가 매연 입자가 거의 없는 지역이므로 점점 표면에 매연 입자가 부착되어서 온도가 하강하는 것이라고 보기는 어렵다. 따라서, 이 상태에서는 열전대 접점이 가장 온도가 높으므로 점점으로부터 열전대 선을 따라 생기는

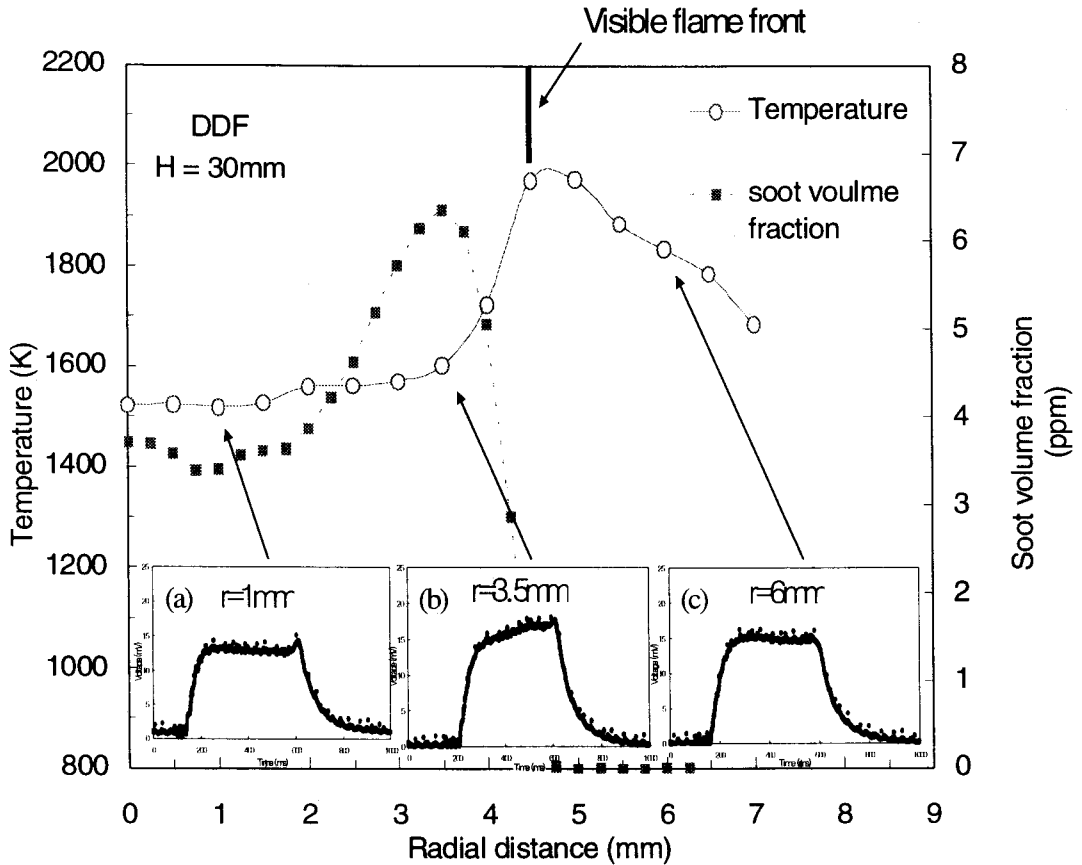


Fig. 3 Temperature histories at different measurement locations

전도 열 손실에 의해, 접점의 온도가 시간이 경과함에 따라 서서히 하강하는 현상이 나타나는 것이다.

따라서 열전대를 사용하는 목적이 열전대 삽입 위치 주위의 가스 온도를 가능한 한 정확하게 읽기 위한 것이므로, 이를 위해서는, 접점이 측정점에 도달한 직후부터 매연이 부착되기 전에 접점의 온도가 준정상 상태(quasi-steady state)로 주위의 가스 온도와 평형을 이루어야 하며, 이 때의 온도값을 온도-시간 그래프의 형태로부터 읽어야 한다.[7, 10] 온도 그래프의 세 가지 패턴에 대해 열전대가

측정점에 도달한 직후, 평형 온도값이 얼마 후에 나타나는지 측정된 결과, 세 경우 모두 측정점에 도달한 후 150 ms 이내에 평형값이 나타났다. 열전대의 접점이 측정점에 도달 후 대략 130 ~ 150 ms 범위에서 얻은 온도 데이터의 평균값으로 온도를 결정하였으며, 이 시간은 매연 부착이 크지 않은 상태에서 온도 평형값을 얻었으므로 실제 화염 온도에 가까운 값이라고 생각된다.

3.2 복사 열 손실 보상

매연 입자의 부착을 피해서 급속 삽입

법에 의해 측정된 열전대의 접점의 온도는 복사 열손실, 열전대 선을 통한 전도 열손실, 열전대의 접점 표면에서 일어나는 열 생성(heat generation)등의 영향으로 주위 기체의 온도보다 약간 낮게 된다. 본 실험에서 사용한 열전대 선이 충분히 가늘어서 접점의 직경이 $160 \pm 25 \mu\text{m}$ [8] 이므로 전도 열손실과 표면에서의 열 생성은 접점에서의 복사 열손실에 비해 충분히 작다고 가정해서, 온도의 보상에는 복사 열손실 만을 고려하였다. 접점에 대해서 준정상 에너지 평형(quasi-steady energy balance)관계식을 다음과 같이 적용하면 측정된 T_j 값으로부터 실제 화염 온도 T_g 값을 얻을 수 있다.[8]

$$\begin{aligned} \epsilon_j \sigma T_j^4 \\ = (\alpha_{g0} Nu_j / 2d_j) (T_g^2 - T_j^2) \end{aligned} \quad (1)$$

이 식에서 ϵ_j 는 접점의 방사율(emissivity), σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, Nu_j 는 접점의 Nusselt 수, d_j 는 접점의 대표지름을 나타낸다. 한편 $\alpha_{g0} \equiv \alpha_g / T_g$ 으로 정의하며, 여기서 α_g 는 가스의 열전도계수로, T_g 에 선형적으로 비례한다고 가정하였다. 이 식 (1)의 좌변은 접점으로부터의 단위 면적당 복사 열손실량을 나타내는 항이며 우변은 대류에 의한 열유입량이다. 본 연구에서는 직경 $50 \mu\text{m}$ 인 선의 접점에 대해 $Nu_j = 2.1$ [12], $\alpha_{g0} = 6.54 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2\text{K}$ [8,13], $d_j = 160 \mu\text{m}$ [8]를 적용하였다. 방사율 ϵ_j 은 Pt의 깨끗한 표면에 대한 값을 온도의 함수로 사용하였다.[11,13]

Fig. 4는 본 실험에서 측정된 대표적인 반경방향 온도 분포를 나타내는 그림으

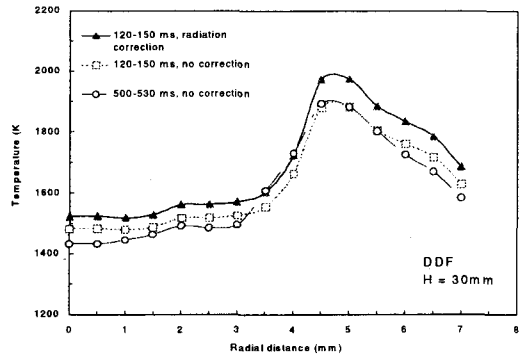


Fig. 4 Comparison of radiation correction temperature, junction temperature and junction temperature after time duration

로 DDF의 높이 30 mm에서의 온도 분포이다. 이 높이에서는 중심축에서의 온도는 약 1,500 K, 최고온도가 나타나는 화염대 부근(반경 5 mm 위치)의 온도는 약 1,950 K 정도이다. 우선 급속 삽입법으로 매연 입자의 부착을 피할 수 있는 매연 입자의 부착 전의 온도(\square)와 부착이 될만한 시간 경과 후(약 0.5 sec)의 온

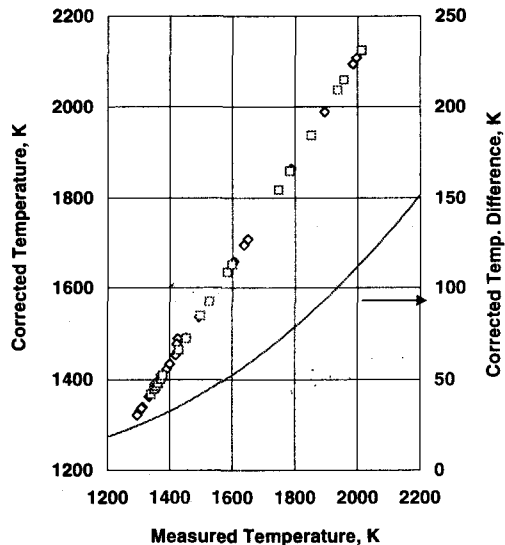


Fig. 5 Comparison between the measured and corrected temperature and the difference

도 측정 결과(○, 500 ms 부근에서 측정된 값)를 비교해 보면, 화염대에서는 거의 비슷한 값을 보이지만, 중심축 부근에서는 매연 입자의 부착에 의해 약 60 K 정도 온도가 낮아지는 것을 알 수 있다.

한편 급속 삽입법에 의한 측정 온도를 바탕으로 복사열손실을 보정한 온도(▲)는, 중심축 부근에서는 약 40 K 정도, 화염대 부근에서는 차이가 커서 약 100 K 가량 온도가 높게 나타난다. 따라서 열전대에 의한 온도 측정 시 급속 삽입법과 복사 열손실 보상을 하지 않으면 측정 결과가, 실제 화염 온도에 비해 최고 50 ~ 150 K 정도 낮은 값을 보이게 된다고 할 수 있다.

Fig. 5는 측정 온도와 복사 열전달 보정 온도를 비교한 그림이다. 온도가 높을수록 복사 보정에 의한 온도 차이가 커져서, 2,000 K에서는 보정 온도 차이는 약 115 K 정도의 차이가 나타난다.

3.3 화염에 따른 내부 온도 분포

내부에 역확산 화염(Inverse Diffusion Flame)이 없는 NDF에 비해, DDF와 O₂DDF에서는 화염의 상류 중심축 부근, 즉 연료 노즐 부근에서 온도가 높다. Fig. 6의 가장 아래 그림의 높이 10 mm 단면에서 중심축에서의 온도는 NDF에서는 1,200 K 정도인데 반해 DDF가 약 1,400 K, O₂DDF에서는 이보다 약간 낮은 1,300 K로 NDF에 비해서는 약간 높다. 역확산(DDF 및 O₂DDF) 화염의 상부에서는 NDF에 비해 매연 농도가 높아 매연 입자에 의한 복사 열손실이 있기 때문에 화염 온도가 약간 낮다. 이 높이 10 mm에서 DDF의 중심축 온도가 가장 높은 것은, DDF에서는 역확산 화염의 길이가 약 8 mm 정도이므로 온도를 측

정한 위치인 10 mm 가 역확산 화염의 끝 부분에 해당하기 때문이라고 생각되며, O₂DDF에서는 역확산 화염의 길이가 3 mm 정도로 짧기 때문에 상대적으로 온도가 약간 낮다.

한편 이 단면에서 화염대 부근(반경 방향 7 - 9 mm 위치)의 온도 분포를 비교해 보면, 우선 화염 온도 피크가 나타나는 위치는 약간 차이가 있지만 최고 온도는 약 2,150 K로 동일하다. 화염 온도 피크는 NDF에서는 7.5 mm 지점에서 나타나는 반면, O₂DDF에서는 7.8 mm 위치, DDF는 O₂DDF보다도 더 바깥쪽인 8.2 mm 부근에서 나타난다. 이것은 화염의 폭이 약간 넓어지기 때문이며, 화염 사진 촬영을 통해 관찰된 현상과 잘 일치한다.[1] 이러한 현상은 DDF의 경우 내부의 역확산 화염에 주입된 공기의 유량때문에 화염의 폭이 약간 넓어지는 것을 의미한다. 한편 O₂DDF에서는 산화제로 약 1/5 유량의 산소만을 주입하기 때문에 화염의 폭이 덜 증가한다. 높이 20 mm이후의 하류에서의 온도 분포는 세 종류의 화염에서 큰 차이가 없이 거의 유사하다. 따라서 중심부의 역확산 화염이 외부의 정상 확산 화염에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

한편 종전의 연구[2]에서 반경 방향 3.5 - 5 mm 범위의 외곽부(peripheral)에서의 매연 체적 분율 분포는 DDF가 NDF, O₂DDF보다 낮은 매연 농도를 보였다. 매연 농도와 생성과정에 가장 크게 영향을 미치는 화염 온도와 연료의 농도(fuel concentration)인데, 세 종류의 화염에서 이 부분에서의 온도가 거의 차이가 없는데도 DDF의 매연 농도가 상대적으로 낮은 것은, 특히 연료 농도 쪽이 영향을 많이 미친 것으로 판단된다. 즉, 화염 내부의 역확산 화염 측에서 유입된

공기 중의 산소 성분은 화염부에서 소모되는 반면 불활성 기체인 질소 성분이 이중 동축 화염 내부의 매연 생성 영역으로 확산되어서 화염 내의 매연 생성 영역에서의 연료 농도가 낮아지기 때문이며, O₂DDF에서 중심축의 공기 대신 질소를 제외하고 산소만을 공급한 O₂DDF에서는 이 부분에서 매연 농도가 낮지 않고 오히려 NDF에 비해 높다는 사실에서 이러한 결론을 얻을 수 있다.

높이 30 mm 이후에서의 온도 분포는 화염의 상류에서와는 달리 DDF와 O₂DDF가 NDF보다 화염폭이 좁아지는 경향을 볼 수 있다. 높이 60 mm 이후에는 세 화염 모두 내부 온도가 1,600 K 이상이지만 산화 영역이기 때문에 매연 농도는 낮아지는데, O₂DDF에서는 화염 내의 매연 농도가 높아서 매연의 산화가 충분히 이루어지지 않기 때문에 화염 외부로 매연 입자가 배출된다.

4. 결론

본 실험에서는 열전대를 이용한 온도 측정 방법으로 화염내 온도 분포를 측정하고 온도 분포와 매연 농도와의 상관관계에 대해 고찰하여 얻은 결론을 정리하였다.

(1) 열전대를 이용한 온도 측정에서 급속 삽입법을 이용하고, 열전대 점점의 복사 열손실 보상을 적용하면 화염의 보상 온도는 측정치에 비해 최고 100 K 정도 높으며, 특히 화염 내의 위치에 따라 측정 결과가 약간씩 차이가 있다.

(2) 중심축 부분에서는 역확산 화염이 있는 DDF의 온도가 최고 500 K 정도까지 높으며, 화염대 부근인 화염의 외곽에서는 세 화염 간에 거의 온도의 차이가 없다.

(3) DDF의 경우 화염 외곽의 매연 농도가 NDF에 비해 낮은 것은 화염 온도의 차이에 의한 매연 생성 억제에 의한 영향이 아니고, 질소 확산에 따른 희석 효과에 의한 연료 농도의 감소로 매연 생성이 감소하기 때문이다.

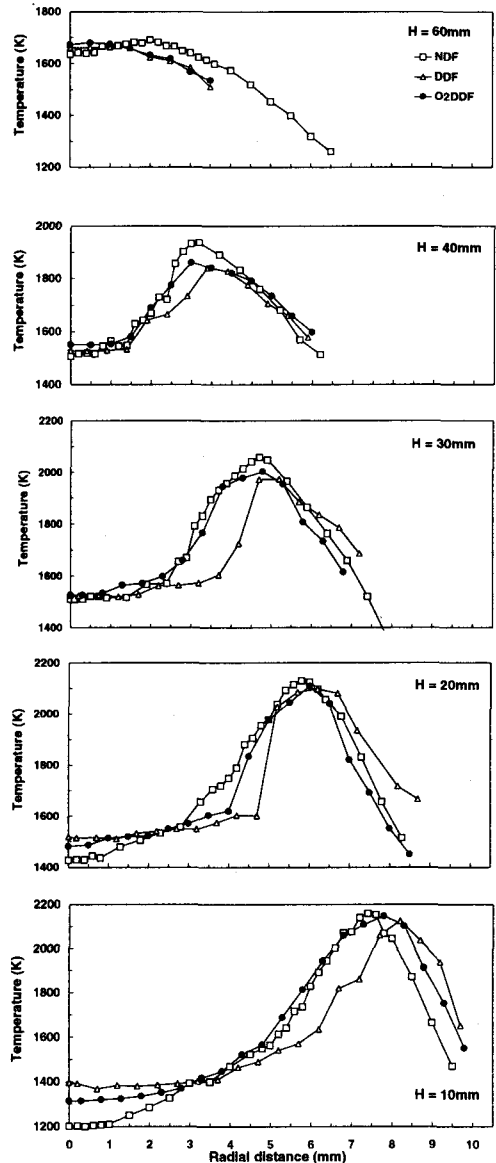


Fig. 6 Radial profiles of flame temperature at different heights

참고문헌

- [1] 정중수, 이교우, 고범승, 강경태, 1998, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(B), pp. 674-679.
- [2] 이교우, 정중수, 최강림, 1999, 에어로졸학회 제1차 학술대회 논문집, p. 117.
- [3] J. B. Moss, C. D. Stewart, and K. J. Young *Combustion and Flame* 101:491-500, 1995.
- [4] Haudiquert, M., Cessou, A., Stepowski, D. and Coppalle, A., *Combustion and Flame* 111, pp. 338-349, 1997.
- [5] Puri, R., Santoro, R. J., and Smyth, Kermit C., *Combustion and Flame* 97:125, 1994.
- [6] Santoro, R. J., Yeh, T. T., Horvath, j. j., and Semerjian, H. G., *Combustion Science and Technology* 53, pp. 89-115, 1987.
- [7] Kent, J. H., and Wagner, H. Gg. *Combustion Science and Technology* 41, pp. 245, 1984.
- [8] Mcneally, Charles S., Ümit Ö. Köylü, Pfefferle, Lisa D. and Rosner, Daniel E., *Combustion and Flame* 109, pp. 701-720, 1997.
- [9] 하영철, 김상수, 대한기계학회논문집 제 16권 제 9호, pp.1796~1804, 1992.
- [10] Rosner, D. E., *Transport Processes in Chemically Reacting Flow Systems*, Butterworths, 1986.
- [11] 박종철, 강기훈, 박찬복, 온도, 한국표준연구소, pp.105-106 및 pp.208, 1985.
- [12] Acrivos, A., and Taylor, T. D., *Phys. Fluids* 5:387-394, 1962
- [13] Holman, J. P., *Heat Transfer*, McGraw-Hill, 1990, pp.648.