

# 급속 삽입법에 의한 동축 이중 확산화염 내부 온도 분포의 측정

정 영 록\* · 남 평 우\* · 이 교 우\*\* · 정 종 수\*\*

## Measurement of Temperature in Double-concentric Diffusion Flames by Rapid Insertion Technique

J. R. Chung\*, P. W. Nam\*, G. W. Lee\*\* and J. S. Jung\*\*

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

### Abstract

The temperature distribution in double-concentric diffusion flames have been investigated experimentally by rapid insertion technique. Using a fine thermocouple and rapid insertion mechanism, the temperature has been measured before soot particles attach the thermocouple junction which can affect the temperature signal by changing the radiation heat loss. For double-concentric diffusion flames, the temperature at the axis is higher than that of normal coflow diffusion flames because of the inverse diffusion flame at the center of the flame. However, it is almost same at the periphery on which the inverse flame does not have an effect.

### 1. 서 론

최근 들어 급속히 환경 오염 문제에 대한 관심이 증가함에 따라 각종 연소기로부터 배출되는 매연 입자의 생성 메커니즘을 규명하고자 하는 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 특히 본 연구실에

서는 정상 확산화염(NDF, Normal Diffusion Flame)의 내부에 역 확산화염(IDF, Inverse Diffusion Flame)이 형성된 혼합된 형태인 동축 이중 확산화염(DDF, Double-concentric Diffusion Flame) 내에서의 매연 생성 특성을 연구해 왔는데, 정상 확산화염의 중앙에 산화제를 주입하여 내부에 역 확산화염이 존재하는 동축 이중 확산화염(DDF) 내에서의 매연 생성에 대한 연구를 통해 얻어진 실험 결과를 이용하면 기존의 여

\* 한양대학교 기계공학과

\*\* 한국과학기술연구원 지구환경연구센터

러 확산화염을 대상으로 개발된 매연 입자의 생성 모델을 확인할 수 있는 중요한 방법이 될 것으로 기대하고 있다. 정중수 등[1]은 중앙의 산화제로 공기를 사용할 때 이중 확산화염에서는 정상 확산화염보다 화염 내부의 온도가 상대적으로 높아서 화염의 내부에서는 매연 입자의 생성이 빨리 시작되고 농도가 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. 이교우 등[2]은 광 산란-감쇠법(Light scattering-extinction method)을 이용하여 화염 내부의 매연 농도 분포를 측정하고 산란 광의 강도를 측정하여 정상 확산화염과 이중 확산화염의 매연 생성 기구를 비교하여 연구를 수행하였으며, 정중수 등[1]의 논문에서 나타난 매연 농도 분포의 차이가 나타나는 원인을 규명하기 위해 각 화염 내의 온도 분포를 열전대의 급속 삽입법(Rapid Insertion Technique)을 통하여 측정하였다. 또한 이 논문에서는 동시에 화염 외곽부의 매연 체적분을 감소의 원인이 중앙부의 공기로부터 확산된 질소 희석이라는 것을 검증하기 위하여 중심부의 산화제를 질소를 제외하고 산소만으로 변경하여 매연 농도 분포를 측정하여 비교하였으며, 예상한 대로 산소-동축 이중확산화염에서는 화염 외곽부의 매연 농도 피크가 정상 확산 화염에서의 값 정도의 수준으로 돌아오는 결과를 밝혔다. 그러나 화염 내에서의 온도 측정 결과, 화염 내부 온도가 예상보다 낮으며, 매연 농도가 높은 위치에서

매연 입자의 부착이 온도 측정에 미치는 영향을 배제하지 못한 것으로 생각된다.

화염 내에서의 정확한 온도 측정을 위해서 Moss et al.[3]과 Haudiquert et al.[4]은 CARS를 이용하였다. CARS를 이용한 화염 내 온도 측정은 비교적 정확하지만, 장치가 복잡하고 값이 비싸며 매연 농도가 높은 화염에서는 정확히 측정하기가 어렵다. 한편 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 해결하여야 하는 문제이다. Santoro et al.[6], Rosner et al.[8], 김상수 등[9]은 이런 문제를 겪으며 여러 종류의 화염에 대해 열전대를 이용하여 온도 데이터를 얻어 왔다.

본 연구에서는 정확한 온도를 정확하게 측정하여 화염 내부의 매연 농도와 상관 관계를 얻기 위한 목적으로 열전대를 이용해서 온도를 측정하였는데, 기존의 실험보다 정량적으로 정확한 온도를 얻기 위해서 급속 삽입 기구를 고안하고 세션 열전대를 사용하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

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 버너로서 내측의 원형 산

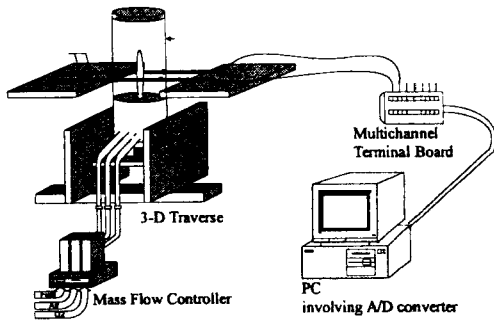


Fig. 1 Experimental setup for measuring temperature

화제 노즐은 내경 8 mm 외경은 10 mm 이며 외측의 환형 연료 노즐은 내경 18mm 외경 20mm이다. 최외측의 공기 노즐은 내경 86 mm, 외경 93 mm로 화염에 대한 외부 교란을 최소한으로 줄이기 위해 최외측공기 노즐 주위에 투명 차단막 외부 원통을 설치하고 차단막 출구에 다시 하니콤폴을 설치하여 출구의 압력 변동이 내부로 유입되지 않도록 차단하였다. 급속 삽입 온도 측정 장치는 화염 내로 삽입되는 열전대, 화염 외부에서 열전대를 지지하는 절연판, 절연판의 빠른 전, 후진을 위해 구동원으로 사용하는 솔레노이드로 구성되어 있다. 열전대는 고온 온도 측정이 가능한 R-type(Pt-Pt/13%Rd)을 사용하였으며, 급격한 온도 변화에 민감하게 반응하도록 직경  $50\mu\text{m}$ 의 세선을 선택하였다. 열전대는 절연판을 거쳐 외부 원통을 빠져나와 연장선으로 사용한 구리선과 연결시키고 구리선의 다른 한쪽 끝을 다채널 터미널 보드에 연결시켰다. 이 터미널 보드는 증폭기(Amplifier)가 내장된 A/D 보드(PCL-818HG)와 연결된다. 솔레노이드는 압력  $0.5\text{ kgf/cm}^2$ 로 절연판을 약 13mm정도 전, 후진시킨다. 채널을 통해

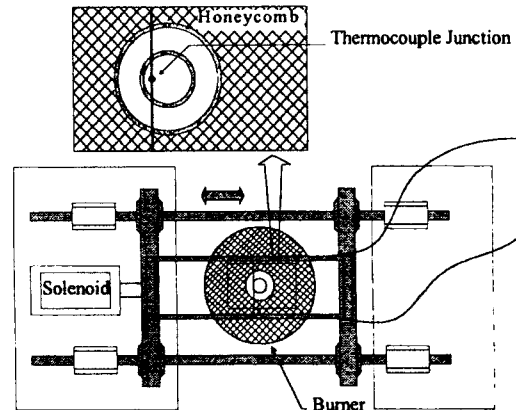


Fig. 2 Top view of the rapid insertion system

100 배 증폭된 신호를 PC로 처리하여 온도 데이터를 얻는다. 버너는 버너 이송 장치를 통해 X-Y-Z방향으로 움직이도록 해 화염의 반경 방향 및 높이 방향의 온도 측정이 가능하도록 하였다.

매연 생성이 많은 에틸렌 화염 등의 매연 생성 영역에 열전대를 삽입하면, 열영동(Thermophoresis) 현상[10]에 의해 매연 입자가 열전대에 달라붙어서 열전대의 접점으로부터의 복사 열손실이 증가되어 열전대의 접점의 온도가 화염의 실제 온도보다 낮게 된다. 열전대를 이용한 온도 측정에서는 이러한 문제를 해결하여야 하므로, 본 실험에서는 직경  $50\mu\text{m}$ 의 가는 열전대를 사용하여 접점의 크기를 최소한으로 하고, 급속 삽입법을 적용하여 열전대가 화염대를 통과하는 시간을 가능한 한 짧게 해서 온도를 측정하고자 하는 위치까지 도달하는 경로에서의 매연입자 부착을 최소화하고, 또한 작은 직경의 열전대를 사용함으로써 접점의 온도 감응성이 좋기 때문에 매연입자의 본격적인 부착 이전에 화염의 실제온도에 가깝도록 온도 측정이

가능하다.

급속 삽입 온도 측정 기술을 사용하려면 화염 부근에서 열전대의 급격한 이송이 필요하기 때문에 화염 내 유동 교란이 있을 수 있다. 이러한 화염 내 유동에 교란을 최소화하도록 절연판을 화염으로부터 가능한 한 멀리 떨어지게 하고 열전대만을 화염 내로 삽입하였고 외기의 영향도 최소화하기 위해 Fig. 2의 실험 장치를 고안하였다.

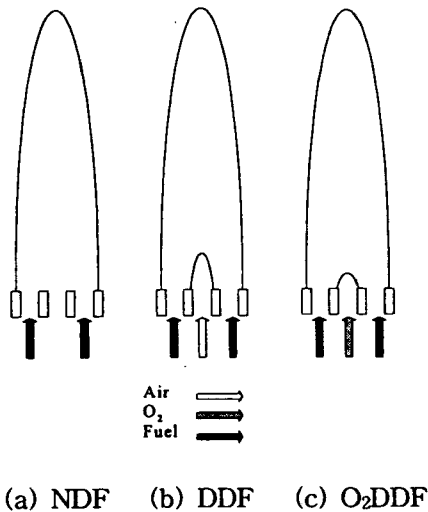


Fig. 3 Flame shape

Fig. 3 은 본 실험의 대상인 3 종류의 화염들이다. 세 화염 모두 연료로 에틸렌을 사용했으며 유량은 에틸렌( $C_2H_4$ ) 0.2 lpm, 외측 공기 30 lpm으로 고정시켰다. Fig. 3-1은 정상 확산 화염(NDF)을 나타낸 것인데 내측의 산화제 노즐에 산화제를 공급하지 않은 경우이다. 동측 이중 확산 화염과 정상 확산 화염의 정확한 비교를 위해서는 내측의 산화제 노즐을 없애고 연료 노즐로 사용해야 하나 다른 연구에서 사용된 동측류 버너의 화

염 형태가 유사하기 때문에 내측 노즐에 산화제를 공급하지 않는 경우를 정상 확산 화염으로 간주하였다. Fig.3-2는 이중 확산 화염(DDF)을 나타낸 것으로 내측의 산화제 노즐에 0.25 lpm의 공기를 공급한 경우이다. Fig. 3-3는 산소 이중 확산 화염( $O_2$ DDF)을 나타낸 것인데 내측의 산화제로 공기 대신 산소를 공급하고, 산소의 유량은 질소에 의한 희석의 효과를 배제하기 위해서 공기 0.25 lpm에서 질소량만큼을 제거한 0.05 lpm으로 하였다. 세 종류의 화염에 대해 동일한 방법으로 버너 팁에서 연직 상방 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 mm 높이에서 각각 중심축으로부터 반경방향으로 0.5 mm 간격으로 온도를 측정하였다. 온도 데이터는 초당 1,000개의 데이터를 1초간 얻었으며 데이터를 얻는 동안 열전대를 화염 내로 삽입하고 열전대의 화염내 체류 시간은 0.5초 이내가 되도록 하였다. 매 측정마다 열전대의 접점에 부착된 매연 입자를 화염의 산화영역에서 산화시켜 제거하고 실험을 수행하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 열전대의 특성 반응

특정한 높이에서 반경방향 0.5 mm 간격으로 측정된 온도 그래프의 형태 (Temperature history)는 화염 내 열전대의 위치에 따라서 크게 3 가지로 구분되었다. 온도 데이터를 얻기 시작한 후 열전대는 화염내로 삽입되고 인출된다. 이러한 과정은 온도 데이터를 얻기 시작한 후 1초동안 이루어지며 1초동안 얻은 온도 데이터는 Fig. 4와 같다. 이러한 추

이는 세 종류의 화염 모두 대체로 비슷한 양상을 보였다.

- i) 그래프의 앞쪽에서 가장 높은 피크 값을 보이고 점점 값이 떨어지는 형태.
- ii) 그래프 앞단부터 꾸준히 상승하고 한참 뒤에 값이 떨어지는 형태.
- iii) 그래프 앞단으로부터 얼마 가지 않

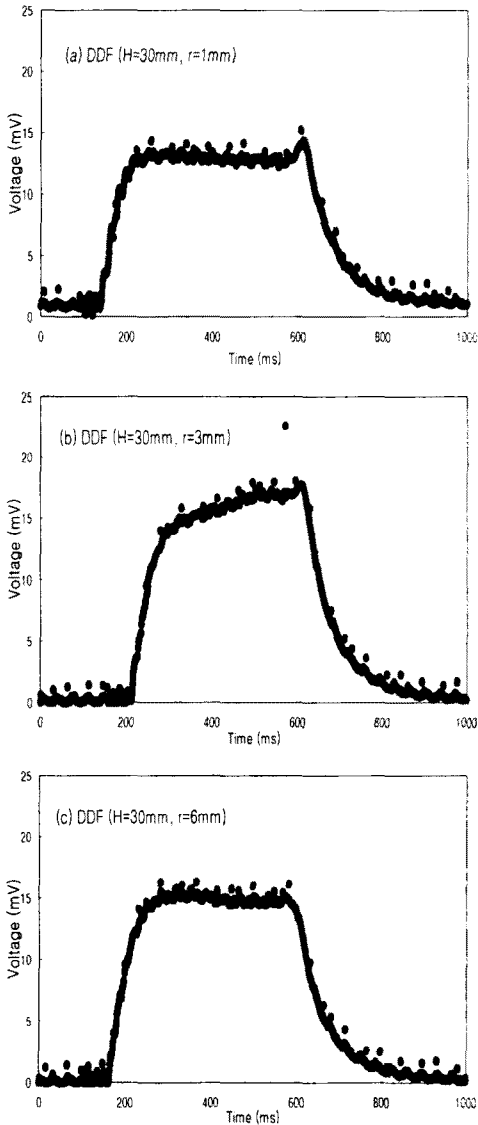


Fig. 4 Temperature history

아 피크값이 나오고 이어서 값이 떨어지는 형태.

Fig. 4-(a)의 경우는 전형적인 형태인데 이 경우에 해당하는 위치는 중심축부터 화염대 직전까지이다. 삽입된 이후 온도가 피크를 보이고 이후 감소하는데, 이것은 열전대의 접점에 달라 붙은 매연 입자에 의한 복사 열손실로 보인다. Fig. 5는 매연입자가 상대적으로 적게 생성되는 메탄(CH<sub>4</sub>) 화염에 대해 같은 위치에서 온도 측정을 한 결과와 비교한 그림이다. 시간이 지나면서 에틸렌 화염에서의 온도는 점점 감소하는 반면 메탄 화염에서의 온도는 그대로 유지되는 형태를 보여준다. Fig. 4-(a)에서 후반부의 작은 피크는 열전대를 빼내기 위해 솔레노이드를 후퇴시키는 과정에서 접점이 외곽의 화염대를 지날 때 생기는 피크인데, 이는 삽입보다 후퇴시의 속도가 느리기 때문에 나타난다. Fig. 4-(b)의 경우는 열전대가 목적 위치에 삽입된 이후 300 ms~400 ms에 걸쳐 온도가 오르는 경향을 보이다가 떨어진다.

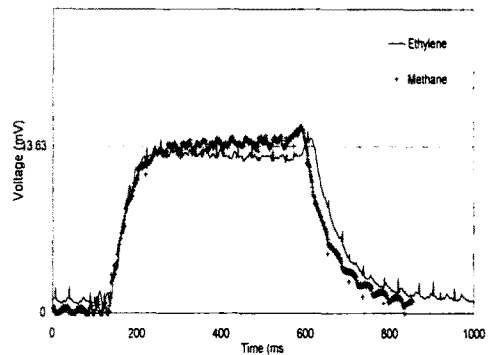


Fig. 5 Typical temperature history for ethylene flame and methane flame.

온도는 대략 100 °C~150 °C 정도 상승한다. 특히 최고 온도가 나타나는 위치에서 안쪽으로 2 mm 떨어진 지점부터 반경 방향으로 화염대까지 이러한 형태가 심하게 나타난다. 이 형태에서 열전대가 삽입된 이후 온도가 오르는 것은 Fig. 2에서 보듯이 접점이 화염대 내부에 있을 때 양쪽의 열전대 선이 화염대에 닿아서 화염대로부터 열전도에 의해 접점의 온도가 조금씩 상승하는 것으로 생각된다. Fig. 4-(c)의 경우는 화염대의 바깥쪽에서 나타나는데 삽입되자마자 피크가 나타나고 이후 온도가 하강하는데 하강하는 온도의 기울기는 점점 커진다. 이 형태가 나타나는 위치가 매연 입자의 산화영역이므로 접점 표면의 매연입자 부착에 의한 것이라기 보다는 접점이 열전대에서 가장 온도가 높은 부분이기 때문에 접점의 양 바깥쪽으로의 열전도에 의한 열 손실로 보인다.

위의 온도 그래프 형태로부터 접점이 측정점에 도달한 직후부터 매연이 부착되기 전에 피크를 얻어야 준정상 상태(quasi-steady state)에서 온도를 읽었다고 할 수 있다.[7][10] 온도를 얻은 시간을 확인하기 위해서 실험 장치를 변경하여 측정 위치에 도달하자마자 온도 데이터가 나오도록 하였다. 이 경우 노이즈가 심해 정확한 피크 값을 얻기가 어려웠으나 피크의 위치를 파악하는데는 어렵지 않았다. 위에서 고찰된 온도 그래프의 세 가지 패턴에 대해 얻은 온도가 측정점에 도달한 직후, 얼마 후에 나타나는지 알 수 있었다. 세 가지 경우 모두 피크는 측정점에 도달 후 150 ms 이내에 나타났다. 그래서 세 가지 경우에 대해 일관성을 두기 위해 온도를 읽은

방법은 대략 열전대의 접점이 측정점에 도달 후 130 ms~150 ms 범위에 위치한 온도데이터의 상한값과 하한값의 평균값으로 하였다. 유효값이라고 인정할 수 있는 범위, 즉 매연 부착이 본격적으로 시작하기 전인 400 ms 안에서 최고치를 얻었으므로 어느 정도 실제 화염 온도가 가까운 합리적인 값이라고 생각된다.

### 3.2 복사 열 손실 보상

측정된 온도는 열전대의 접점의 온도이므로 복사 열손실, 유도선을 통한 전도 열손실, 열전대의 접점 표면에서 일어나는 열 생성(heat generation)등을 고려해 기체의 온도의 값을 구해야 한다. 그러나 본 실험에서 택한 열전대 선의 직경이 매우 작아서 접점의 직경은  $160 \pm 25 \mu\text{m}$  [8]이므로 전도 열손실과 표면에서의 열 생성은 접점에서의 복사열손실에 비해 충분히 작은 값이므로 복사 열손실만을 고려하였다. 접점에서 준정상 에너지 평형 관계(quasi-steady energy balance)를 적용하면 다음과 같이 측정된  $T_j$  값으로부터 실제 화염 온도  $T_g$  값을 얻을 수 있다.[8]

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

여기서  $\epsilon_j$ 는 접점의 방사율,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수,  $Nu_j$ 는 접점의 Nusselt 수,  $d_j$ 는 접점의 대표지름, 그리고  $\alpha_{g0} \equiv \alpha_g / T_g$ 이다. 여기서  $\alpha_g$ 는 가스의 열전도계수로,  $T_g$ 에 선형적으로 비례한다고 가정하여,  $\alpha_{g0}$  값을 상수로 하였으므로,  $\alpha_g$ 가 상수라는 가정보다는

훨씬 합리적이다. 이 식의 좌변은 단위 면적당 복사 열손실량이며 우변은 대류 열유입량이다. 직경 50  $\mu\text{m}$ 인 선의 접점에 대해  $Nu_j = 2.1$ [12],  $\alpha_{g0} = 6.54 \times 10^{-5} \text{ W/mK}^2$  [13],  $d_j = 160 \mu\text{m}$ [8]를 적용하였다. 방사율  $\epsilon_j$ 은 Pt의 깨끗한 표면에 대한 값을 취했으며 이때 방사율은 Fig. 5와 같이 온도에 따라 편차가 심해 온도마다 각기 다른 값들을 주어  $T_g$  값을 구하였다.[11,14] 그 결과 Fig. 6에서처럼  $T_j$ 에 따라  $T_g$ 값과  $T_j$ 값과의 차이는 큰 차이를 보였다.

### 3.3 화염내 온도 분포

Fig. 7-1은 NDF의 온도 분포를 보여주는 그림이다. NDF는 가운데 산화제가 주입되지 않기 때문에 상류 중심축에서의 온도가 낮는데 화염이 좁아지는 하류로 갈수록 온도가 높아져서 60mm 단면에서는 반경방향의 최고온도 근처까지

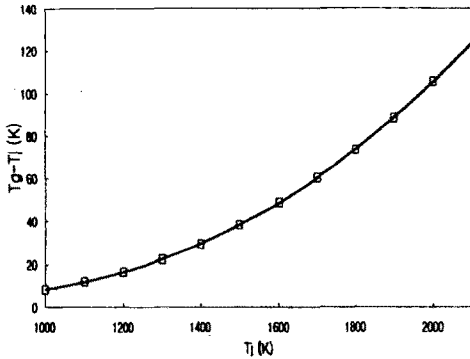


Fig. 6 Relationship between junction temperature and compensated value

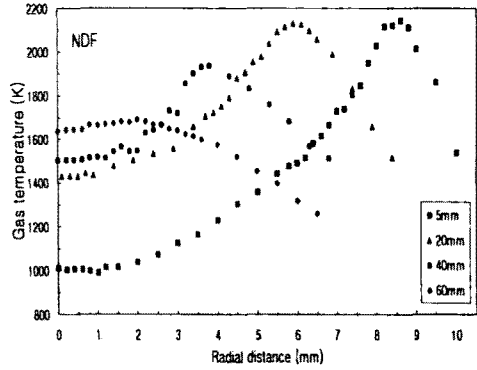


Fig. 7-1 Temperature profile for NDF

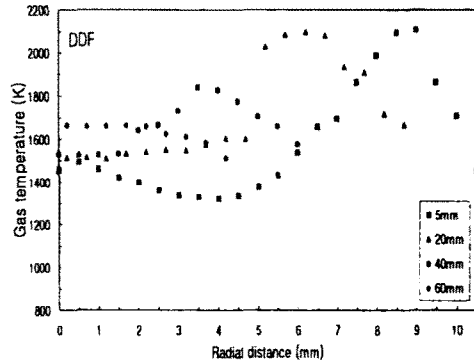


Fig. 7-2 Temperature profile for DDF

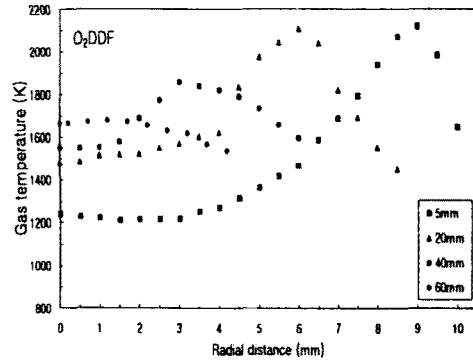


Fig. 7-3 Temperature profile for  $\text{O}_2$ DDF

이른다. Fig. 7-2는 DDF의 온도 분포인데 중앙에서 산화제로 공기가 주입되어 형성되는 높이 3 mm 정도의 역확산 화염때문에 상류의 내측에서의 온도가 상당히 높은 값을 보이며, 하류로 갈수록 역확산 화염의 영향이 점차 적어진다. Fig. 7-3은 내측에서 산화제로 산소를 주입한 O<sub>2</sub>DDF의 온도분포를 나타내고 있다. DDF의 경우에 비해 내측의 유량이 적은 탓으로 실제 육안으로 보인 내측의 역확산 화염의 크기가 높이 3 mm 정도로 매우 작았다. 이 때문에 5 mm 높이에서의 온도 분포는 내측에서의 온도가 그다지 높지 않음을 보여주고 있다. 하류쪽으로 올라가면서 역확산 화염의 영향이 DDF에 비해서도 더 급격히 감소한다.

### 3.4 화염 중심축에서의 온도 비교

Fig. 8 을 보면 버너에서 연직상방 5 mm 지점에서 30 mm 지점까지는 화염 내부의 역확산 화염의 유무 및 크기의 영향을 받아 DDF의 온도가 가장 높고

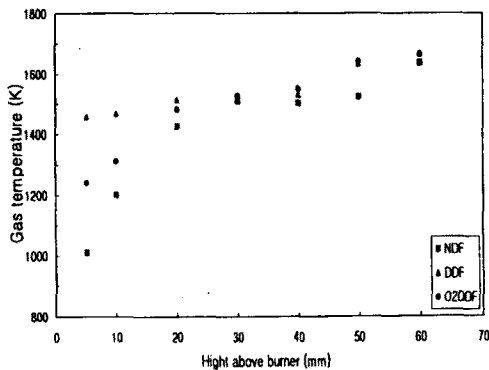


Fig. 8 Centerline profile of temperature

O<sub>2</sub>DDF, NDF의 순서이다. 이후 하류로 가면 IDF의 영향은 사라지고 세 화염 모두 온도에 별 차이가 없었다. Fig. 9에서 높이 60 mm에서의 반경 방향 온도 분포를 보면, DDF와 O<sub>2</sub>DDF는 중심축에서 거의 최고 온도를 가지는 반면 NDF의 경우 중심축에서 반경방향으로 2 mm 정도 떨어진 지점에서 최고 온도를 나타내는 현상이 나타난다.

### 3.5 높이별 반경방향 온도 비교

버너에서 연직상방 5 mm 높이에서는 내측의 온도 분포만이 다를 뿐 세 화염 모두 거의 일치하는 형태를 보인다. 다만 DDF와 O<sub>2</sub>DDF가 NDF보다 화염대로 보이는 최고 온도 지점의 바깥쪽으로 약간 퍼지는 형태를 보여준다. 10 mm 높이에서는 세 화염 모두 올라가는 온도의 형태는 비슷하지만, DDF의 경우 다른 두 종류의 화염에 비해 위치가 반경방향 바깥쪽으로 이동된 형태를 띤다. 또 NDF와 O<sub>2</sub>DDF를 비교할 때 최고 온도를 보이는 위치는 같지만 O<sub>2</sub>DDF의 경우 화염대 바깥쪽에서 온도가 퍼지는 현상을 볼 수 있다. 그 원인은 DDF와 O<sub>2</sub>DDF는 모두 역확산 화염의 영향을 받지만, DDF는 내측 산화제로 사용된 공기의 유량이 O<sub>2</sub>DDF의 산소 유량보다 크기 때문에 화염대가 바깥쪽으로 이동되었다고 생각된다. 높이 30 mm에서는 최고온도를 나타내는 위치가 세 화염이 근접하였다. 높이 40 mm에서는 형태와 위치가 모두 비슷하였고 높이 50 mm에서 하류로 갈수록 NDF가 DDF나 O<sub>2</sub>DDF보다 화염폭이 느리게 좁아지는 현상이 보인다.



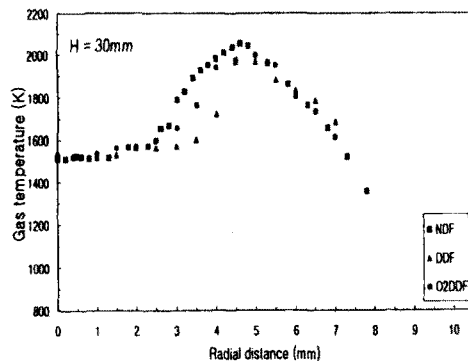
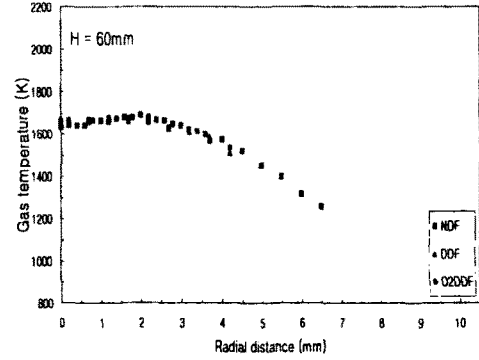
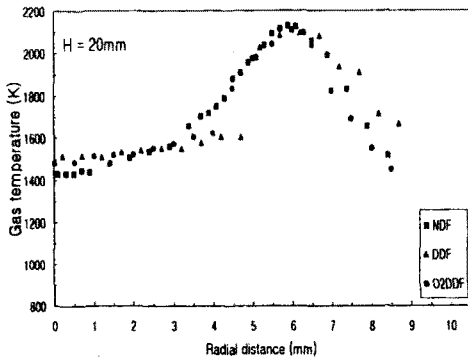
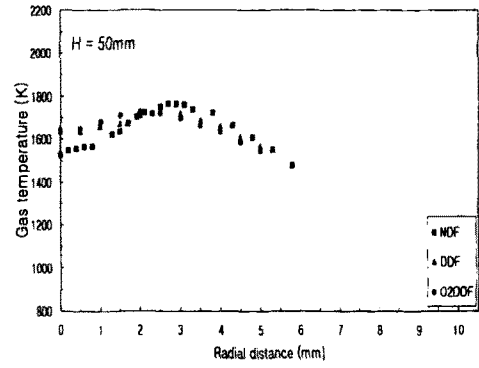
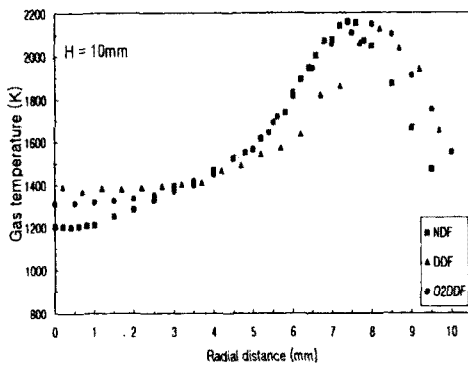
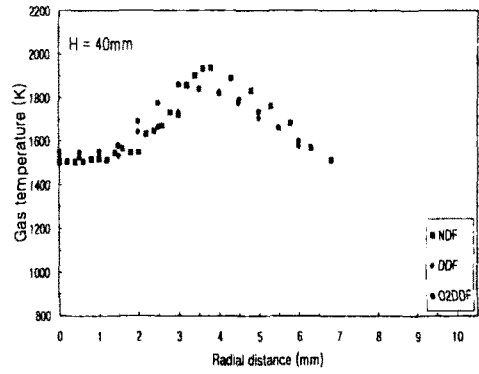
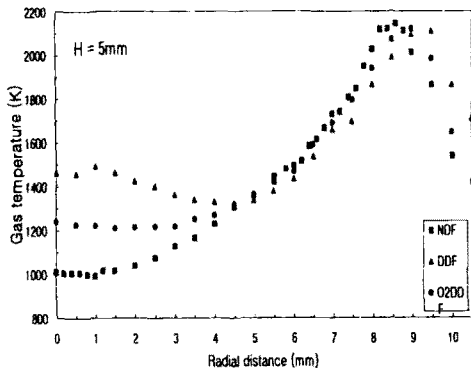


Fig. 9 Radial profile of temperature

#### 4. 결론

본 실험에서는 열전대를 이용한 온도 측정 방법으로 화염내 온도 분포를 구하고 이에 대해 개략적인 고찰을 하였다. 실험 과정 중에 작은 여러가지 문제가 있었지만, 특히 열전대의 열팽창으로 인

해 온도 분포 그래프에서 정확한 중심축을 잡기가 힘들었고, 화염대 부근에서는 열전대에서의 열전도 현상도 무시할 수 없는 오차의 원인으로 작용하였다. 그러나 위와 같은 실험 방법을 이용하면 여러 가지 형태의 화염에 대한 온도 측정에 많은 기여가 있으리라 생각한다.

### 참고문헌

[1] 정중수, 이교우, 고범승, 강경태, 1998, *대한기계학회 춘계학술대회 논문집(B)*, pp. 674-679.

[2] 이교우, 정중수, 최강립, 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] M. Haudiquert, A. Cessou, D. Stepowski, and A. Coppalle, *Combustion and Flame* 111:338-349, 1997

[5] R. Puri, R. J. Santoro, and Kermit C. Smyth, *Combustion and Flame* 97:125, 1994

[6] Santoro, R. J., Yeh, T. T., Horvath, j. j., and Semerjain, H. G., *Comustion Sci. Technol.* 53:89-115, 1987

[7] Kent, J. H., and Wagner, H. Gg. *Combust. Sci. and Tech.*, 41:245, 1984

[8] Charles S. Mcenally, Ümit Ö. Köylü, Lisa D. Pfefferle, and Daniel E. Rosner , *Combustion and Flame* 109:701-720, 1997

[9] 하영철, 김상수, *대한 기계학회 논문집 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, 1985 pp.105-106 pp.208

[12] Acrivos, A., and Taylor, T. D., *Phys. Fluids* 5:387-394, 1962

[13] Holman, J. P., *Heat Transfer*, McGraw-Hill, 1990, pp.648