

## 동축 층류 확산화염에서의 그을음 생성

심성훈\* · 신현동\*\*

### Soot Generation in a Coaxial Laminar Diffusion Flame

Sung Hoon Shim and Hyun Dong Shin

#### ABSTRACT

Soot generation by combustion process has been investigated with objective of understanding of chemical reaction responsible for its formation in a coaxial laminar propane jet diffusion flame. For the direct photos, as the coflowing air flow rate is reduced, the area of soot luminous zone increases at first, then becomes smaller and smaller, and even disappears. The aspects of soot deposition can be acquired by using nine 15  $\mu\text{m}$  thin SiC fibers are positioned horizontally across the flame. Deposited soots on SiC fibers show the soot inception point and growth and soot oxidation zone in a typical propane diffusion. Soot is not generated anymore in a oxidizer deficient conditions of near-extinction and flame is fully occupied by transparent blue flame. It suggests that nonsooting pyrolygneous blue reaction is being dominant in a oxidizer deficient ambience. In comparison with luminosities of SiC fibers and flame itself, indirect evidence is found that the process of soot nucleation and growth is endothermic reaction. It is remarkable that there exists two adjacent regions to have antithesis characteristics; one is exothermic reaction of blue flame and another endothermic reaction zone of soot formation.

**Key Words** : Soot generation, SiC fiber, Laminar diffusion flame

#### 1. 서 론

본 연구는 제한된 연소실내에 형성된 프로판 확산화염에 대하여 동축류로 공급되는 공기량의 변화에 의한 화염거동의 변화를 분석하고 공기 결핍 상태에서의 화염이 어떠한 구조를 가지는가를 규명하여 궁극적으로는 연료 연소가 시작되는 기구를 규명하는 것이 목적이다. 모든 연료의 연소는 초기단계에서 연료의 분자가 와해되어 새로운 분자를 생성하면서 연소가 진행된다. 산소 결핍 상태에서는 이와 같은 열분해 반응이 주로 일어나면서 탄소의 고리가 깨어지고 탈수소화반응이 일어나면서 전구물질이 생성된다[1]. 이를 그을음(soot) 생성의 준비단계로 볼 수 있는 것이다. 따라서, 육안으로 보이는 화염의 대부분을

형성하는 그을음 생성의 변화를 주목할 필요가 있다. 본 연구에서는 우선 전형적인 층류 확산화염에서 생성되는 그을음의 양상을 분석하고 또한, 제한된 층류 확산화염에서 동축류로 공급되는 공기의 변화에 따른 그을음의 생성 경향을 분석함으로써 연소 화학 반응의 초기 단계를 규명하는 데에 필요한 자료를 제공하고자 한다.

대체적으로 연료 과농 연소에서 생성되는 그을음은 직경이 50 nm 근방의 아주 작은 입자로 독성과 발암성을 가진 공해물질로 알려져 있다.<sup>(2)</sup> 여기에 그을음의 전구물질로 알려진 다중고리 방향족 탄화수소(PAHs)는 그을음 입자의 표면에 흡착되어 그 위해도를 증가시키고 있다. 그을음의 생성과정은 아주 오래전부터 고전적인 문제로 다루어져 왔고, 근래에 들어 그 전구물질로서의 PAHs의 역할에 대한 논의가 많다.

최근의 연구에서, 1994년에 D. B. Makel과 I. M. Kennedy는 공기가 노즐로 공급되고 주위의

\* 한국기계연구원 열유체환경연구부

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

동축류로 연료가 공급되는 화염에서 그을음의 분포를 광다이오드를 이용해 조사하였고[3], 1995년에 P. B. Sunderland 등은 아세틸렌의 층류확산 화염에서 대략 1250 K 이상의 온도에서 그을음의 발생이 활발해진다는 것을 보고하였다[1]. 1997년에 Smyth 등은 역시 LIF를 이용하여 메탄, 프로판, 에틸렌 확산화염에 대하여 안정상태와 펄럭거리는(flickering)상태에 대하여 그을음과 PAHs의 분포를 측정하였다[5]. 1997년에 Randall 등은 LII(Laser Induced Incandescence)와 LIF를 동시에 사용하여 분류 확산화염에서의 그을음 분포를 측정하여 주목할 만한 비교를 수행하였다[6].

전형적인 확산화염에서 그을음과 PAHs의 분포를 보면 그을음의 부피분율(volume fraction)이 화염대에서 가장 높아 발광 강도(intensity)가 강하게 분포되어 있고 PAHs는 그 안쪽에 분포되어 있음을 보여준다. 1999년에 이교우 등은 열전대의 급속삽입에 의한 온도 측정법으로 매연 생성과 온도분포와의 관계를 고찰하였다[7]. 2000년에 Böhm은 메탄의 대향류 확산화염에서 자외선 레이저 유도 형광법을 이용하여 PAHs의 분포를 측정하는 바 있으며[8], Walsh는 LII를 사용하여 부력이 작용하는 메탄의 층류 확산화염 및 대향류 확산화염에서 그을음의 부피분율을 계측하였다[9]. 그러나, 아직도 산소결핍으로 인해 소염상태에 근접한 확산화염의 그을음과 PAHs의 분포에 관한 정보는 부족한 상태로 그 거동이 많이 알려지지 않고 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치는 연소실내에 동축류 확산화염을 형성하도록 하는 장치로서 구성도는 Fig. 1과 같다. 연소실은 중앙부에 황동으로 가공한 연료노즐이 있고 그 주위로 공급되는 공기의 유동 균일화를 위해 하부에 스크린 및 세라믹 볼과 세라믹 하니컴(honeycomb)을 설치하였다. 연소실은 관찰과 촬영을 위하여 석영(quartz)유리를 창으로 설치하였으며, 연소실 폭은 86mm, 하니컴 상부 직선부의 높이는 300mm이다.

노즐은 내경이 8mm의 것을 사용하였으며 출구부의 재순환 영역을 최소화하기 위하여 두께를 가능한 한 얇게 가공하였다. 연소실의 상부는 개방되어 배기가스가 배출되도록 하였다. 동축류로 공급되는 연료와 공기는 하류의 압력이 변화하여도 설정유량을 유지할 수 있는 MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 공급하였다. 또한, 하류의 압력 맥동이 관내로 전달되어 불안정해지는 영향

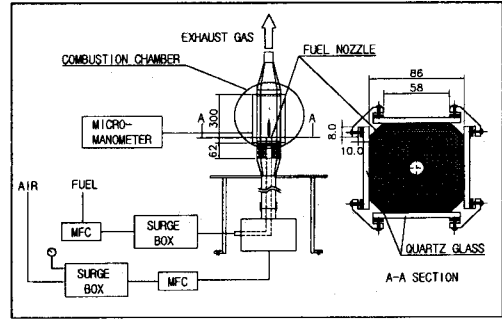


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

을 최소화할 수 있도록 완충 상자(surge box)를 통하여 공급되도록 하였다.

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1. 실험조건

본 연구를 위한 실험은 연소실내에 동축류로 공급되는 공기량을 변수로 하여 화염의 변화를 조사하였다. 연료는 99.5% 순도의 프로판을 사용하였으며, 유량은  $Q_{fuel}=94.5 \text{ cc/min}$  (평균 유속  $V_{inj}=3.13 \text{ cm/s}$ ,  $Re_f=70$ )으로 고정하였다. 동축류로 공급되는 공기 유량( $Q_{air}$ )은 80.0, 9.0, 3.0, 2.5, 2.2, 1.8, 1.6  $l/min$  (평균유속  $V_{air}=19.04, 1.90, 0.71, 0.59, 0.52, 0.43, 0.38, m/s$ )로 이론공기량의 약 35배에서 0.7배까지 변화시키면서 화염의 거동을 관찰하였다.

상기의 공기 유량은 주어진 연료량에 대하여 충분한 산화제가 공급되는 상태, 산화제 부족으로 그을음이 발생이 증가하는 상태, 산화제의 결핍으로 인해 소염되기 직전의 상태로 구분 할 수 있다.

#### 2.2.3 SiC 필라멘트를 이용한 온도계측 및 그을음 부착

Dow Corning Co.에서 생산되는 단일 소선의 공칭 직경이  $15 \mu\text{m}$ 인 SiC 필라멘트를 화염의 중심부에서 반경방향으로 관통하도록 노즐위 5mm 위치에서부터 5mm 간격으로 9개를 설치하였으며, 필라멘트의 양쪽에는 무게를 달아 장력을 유지하였다. 우선, 화염장에서 SiC 필라멘트의 발광 강도를 디지털 카메라 ( $1712 \times 1368 \text{ pixels}$ , Olympus)로 촬영하고 그 상대적인 강도를 8 비트(bit) ( $2^8$ )로 디지털화하여 이 분포를 그을음의 발생이 없고 안정된 화염상태에서 열전대로 측정 한 온도 분포와 비교하여 SiC의 발광 강도로 온도를 예측할 수 있음을 확인하였다.

다음으로 이 결과를 이용하여 그을음이 발생하

는 화염에서 SiC 필라멘트의 발광강도와 SiC에 부착되는 그을음의 양상 및 화염 자체의 발광 강도를 비교 분석하여 그을음이 생성되는 반응에 대한 정보를 얻고자 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 화염 양상과 그을음 생성

우선 연소실내에서 동축류로 공급되는 공기의 양을 변화시켜가면서 프로판 층류 확산화염의 변화 양상을 직접 사진으로 촬영하여 그 결과를 Fig. 2에 게재하였다. 이때 공급된 연료의 양은 94.5 cc/min ( $V_{inj}=3.13\text{ cm/s}$ ,  $Re_f=70$ )이다.

그림에서 보는 바와 같이 공급되는 공기의 양이 감소할수록 그을음이 연소되어 밝게 빛을 내는 노란색 화염의 영역은 처음에는 점점 증가하다가 다시 감소하게 되며 중국에는 이 영역은 거의 완전히 사라지고 투명한 청염이 지배적으로 나타난다. 그을음의 발생을 살펴보면 산화제의

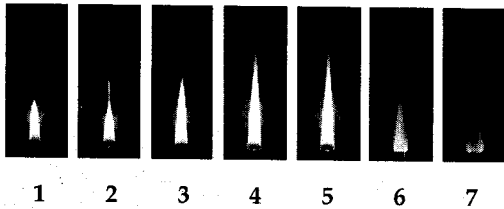


Fig. 2 Several aspects of propane diffusion flame with variation of coflowing air flow rate (8mm i.d. nozzle,  $Q_{fuel}=94.5\text{ cc/min}$ ,  $Q_{air}=80.0, 8.0, 3.0, 2.5, 2.2, 1.8, 1.6\text{ l/min}$  from left)

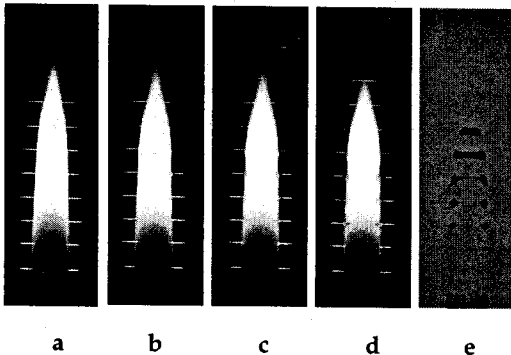


Fig. 3 Sooting aspects of unconfined diffusion flame w.r.t. elapsed Time : (a) 30" (b) 1'30" (c)2'30" (d)3'30" (e) 5' ( $Q_{fuel}=94.5\text{ cc/min}$ ,  $Q_{air}=80.0\text{ l/min}$ )

감소에 따라 처음에는 그을음의 꼬리가 화염의 하류로 길어지나 다시 그을음의 생성이 줄어들어 산소 결핍으로 인한 소염 직전의 화염에서는 더 이상 그을음의 연소에 의한 황염이 거의 보이지 않는다. 즉, 이 영역에서는 그을음을 발생시키거나, 그을음을 연소시킬만한 충분한 산화제가 없음을 말해주는 것이다. 결국 극단적으로 산화제의 공급이 감소하게 되면 화염은 온도가 낮아지고, 반응율과 열방출율이 감소하여 소염에 이르게 된다.

그림의 4의 조건에서와 같이 공급되는 공기량이 이론 공기량의 약 130%로 감소하게 되면 검은 그을음의 께적 즉, 스모크(smoke)가 화염의 하류로 길게 이어지며 화염도 함께 길어진다. 즉, 이 조건은 그을음 입자의 생성은 이루어지지만 생성된 그을음을 완전히 산화시킬 수 있는 산화제가 공급되지 않는 조건인 것이다.

공급 공기의 양을 더욱 줄여 사진의 5, 6, 7의 조건은 공급된 공기 유량이 연료 유량의 이론 공기량보다 적은 상태이다. 공기량이 이론 공기량의 70%인 1.6 l/min 가 되면 화염은 부분적으로 노출 팁에서 이탈하여 불안정해 지고 더 이상 공기량이 감소하면 소염된다. 사진의 6,7에서 보는 바와 같이 공기량이 감소하여 산소 결핍 상태가 되면 육안으로 관찰되는 화염은 그을음이 연소되어 생기는 밝은 황염이 급격히 감소하고 투명한 청염이 황염을 둘러싸면서 그 면적이 점차 증가한다. 소염 직전의 화염인 7의 경우에는 황염은 거의 보이지 않게 되며 화염 전체가 청염이 지배적인 상태가 된다. 이때, 화염의 하류로 이어지는 그을음의 꼬리나 입자 배출도 육안으로 관찰되지 않는다. 가끔 부분적으로 오렌지색의 화염이 원주상의 일부분에 나타나는데 이는 공기기 아주 소량 공급됨으로 인해 나타나는 산화제 유동의 불가피한 불균일에 기인하는 것으로 보인다.

즉, 산소 결핍상태에서는 화염내에서 그을음이 더 이상 생성되거나 연소되지 않는 것으로 생각할 수 있다.

화염장에서의 그을음 생성에 대한 정보를 보다 더 면밀히 조사하기 위하여 연소실을 제거한 상태에서 화염장내에 설치된 9개의 SiC 필라멘트

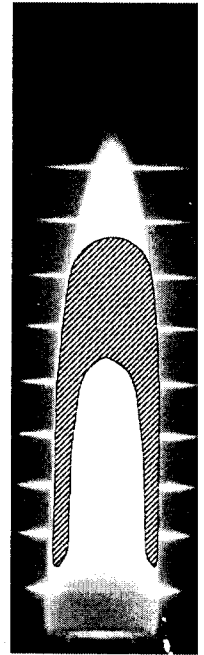


Fig. 4 Sooting Zone

에 그을음이 부착(deposit)되는 형태를 시간의 경과에 따라 관찰하였다. 동축류로 공급되는 공기량은 이론 공기량의 약 35배인  $80.0 \text{ l/min}$ 으로 전형적인 확산화염의 안정된 화염상태를 나타내는 조건이다.

결과를 나타낸 Fig. 3을 보면 이미 30초대에 화염 상류부의 밝은 화염대 경계부분에서 그을음이 최초로 생성되기 시작한다는 것을 알 수 있다. 이는 1분 30초 후의 그림에서 보다 뚜렷이 나타난다. 즉, 그을음은 그 입자가 연소되는 밝은 노란색 화염(soot luminous flame)의 상류부에서 화염대의 안쪽 경계면에서 최초로 생성되기 시작하는데 노즐 위 15 mm 위치의 필라멘트에서부터 뚜렷하게 보이는 것을 알 수 있다. 이 그을음은 화염면에서 시작하여 안쪽으로 성장해 나감을 알 수 있는데 이 부분의 그을음 생성영역은 매우 좁다는 것을 알 수 있다.

반면, 화염의 하류부분에서는 그을음이 화염내를 가로지른 SiC 필라멘트의 전 영역에 걸쳐 부착되고 있음을 보여주고 있다. 화염의 가장 하류부분에서는 그을음이 부착되지 않고 있는데 이 영역은 그을음이 산화되는 고온 영역으로 보고되어 있다. 그림의 e와 같이 5분 경과후 부착된 그을음의 형태를 보면 전형적인 확산화염에서 그을음이 생성되는 영역을 개략적으로 그려볼 수 있다. 이를 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림의 화염은 같은 조건이며 노출시간을 1초로 하여 찍은 사진이다.

SiC 필라멘트의 발광 강도(intensity)를 보면 노즐 근방의 상류부에서나 그을음이 연소되는 화염의 영역에서나 청염이 위치한 곳에서 그 강도가 가장 높게 나타나고 있는 것에 주목할 필요가 있다.

다음, 제한된 연소실내에서 동축류로 공급되는 산화제의 양이 감소하게 되면 프로판 확산화염의 그을음 생성 형태는 완전히 달라진다. Fig. 5는 연소실로 제한된 동축류 프로판 확산화염에서 공기량을 감소시켜가면서 그 거동을 촬영한 것이다. 이 경우에 공기의 공급량은 이론 공기량보다 적은 조건이다. 그림의 (a)의 조건에서는 이론 공기량의 약 98%를 공급하였으며, 연소 지속시간은 15분으로 이전보다 3배로 하였는데도 SiC 필라멘트에 부착되는 그을음의 양이 현저하게 감소하였음을 알 수 있다. 또한, 그림의 (b)에서 보는 바와 같이 그을음의 생성이 시작되는 위치도 하류로 이동하였고 그을음이 부착되는 영역도 하류방향으로 넓어져 화염의 거의 전 영역에서 그을음이 생성되고 있음을 보여준다. 화염의 하류에 스모크가 나타나는 것으로 보아 그을음의 산화영역이 없어지고 있음을 알 수 있다.

보다 공기량을 줄이면 그림의 (c) 및 (d)와 같

이 그을음은 더 이상 필라멘트에 부착되지 않는다. 이 조건에서는 화염의 하류부로 스모크도 나타나지 않는 것으로 보아 그을음의 연소는 물론, 생성 자체가 이루어지지 않는 것으로 사료된다.

즉, 산소가 결핍된 확산화염에서는 프로판이 연소초기 단계의 반응으로 탄소 고리가 끊어지고 수소가 유리되는 열분해 반응이 주를 이루며 따라서, 그을음이 생성되거나 연소되는 단계에까지 이르지 못하는 것으로 정리할 수 있다.

참고로, 여기서도 앞에서 언급한 바와 마찬가지로 SiC 필라멘트에서 가장 발광의 강도가 강한 부분은 청염의 반응대임을 확인할 수 있다.

### 3.2 그을음 생성 반응과 온도

여기서, Fig. 3과 같은 조건의 화염의 상류부분을 노출시간을 1초로 증가시켜 찍어보면 Fig. 6과 같이 그을음이 부착되는 밝은 노란색의 화염대 바깥쪽에 투명한 파란색의 청염대가 존재하는 것을 볼 수 있다. 널리 알려진 바와 같이 노즐에 가까운 화염의 상류부에는 거의 예CH 활성기가 많이 분포한 청염만이 존재하고 있으며 하류로 갈수록 청염의 강도는 약해지고 있다. 또한, SiC 필라멘트의 발광 강도가 이 청염대에서 가장 강하다는 것을 알 수 있다. 이는 이 청염 부분의 온도가 가장 높다는 것을 암시하는 것이다. 즉,

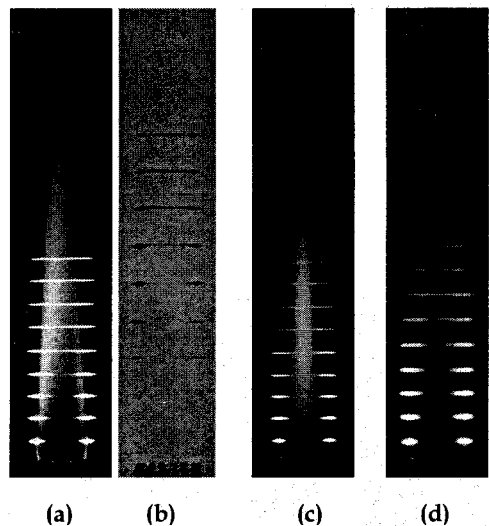


Fig. 5 Direct photos of flame, SiC fiber luminosity and soot deposition of confined diffusion flames in a oxidizer deficient ambience ( $Q_{\text{fuel}}=94.5\text{cc/min}$ , (a) $Q_{\text{air}}=2.2\text{l/min}$ , (b) magnified sooting image of flame (a) deposited for 15 minutes, (c) $Q_{\text{air}}=1.8\text{l/min}$ , (d) $Q_{\text{air}}=1.6\text{l/min}$ , exposure time=1sec)

상류부에서는 청염대의 온도가 가장 높고 하류로 갈수록 온도의 반경 방향의 최고치의 위치는 화염의 내부로 이동한다.

여기서, 관심을 가진 부분은 청염대 즉, SiC 필라멘트의 발광 강도가 높은 부분(온도가 가장 높을 것으로 예상되는 부분)이 밝은 노란색으로 화염 자체의 발광강도가 가장 높은 영역(soot luminous zone)과 매우 인접한 바로 바깥쪽에 위치한다는 사실이다. 이 결과와 더불어 온도를 정확하게 계측할 수 있다면, 그을음의 생성과 온도에 관련된 반응에 관한 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

이미, 1987년 R. J. Santoro 등의 온도 계측과 그을음의 산란강도 측정결과의 비교에서 반경방향에서 그을음의 생성 시작 위치가 최고 온도대가 아님을 밝힌 바 있다. 그러나, 이때의 온도 계측 결과는 열전대를 이용한 것이므로 화염대 내부의 정확한 온도분포를 반영하지 못해 그을음의 생성과 온도의 상관관계에 대한 더 이상의 유용한 결과를 끌어내지 못하였다[10].

열전대로 측정된 화염 내부의 온도분포는 화염대 고온부에서 열전대로의 전도열로 인하여 실제 가스의 온도보다 높게 나타난다는 것이 CARS나 TFP(Thin Filament Pyrometry) 측정 결과에 의해 알려져 있다[11].

본 연구에서는 그을음의 생성과 관련한 화염의 정보를 얻기 위하여 화염내부의 온도 분포 경향을 보다 엄밀히 분석하고자 하였다. 대상 화염이 석영 유리의 창을 가진 연소실내에 제한된 점을

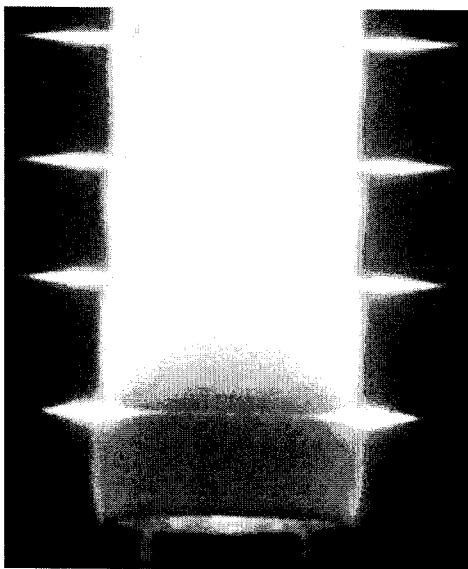


Fig. 6 Direct photo. of unconfined flame ( $Q_{fuel}=94.5$  cc/min,  $Q_{air}=80.0$  l/min, exposure time=1sec)

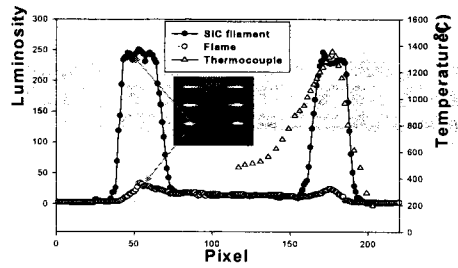


Fig. 7 Luminosity and temperature profiles of confined stable flame ( $\varnothing 8$  Nozzle,  $Q_{fuel}=94.5$  cc/min,  $Q_{air}=1.80$  l/min,  $y=5$ mm for SiC filament,  $y=4$ mm for flame)

고려하여 SiC 필라멘트를 이용한 온도 계측을 시도하였다.

기존 연구자들은 SiC 필라멘트의 발광 강도를 적외선 검출기를 이용하여 획득하여 온도와의 상관관계를 도출하였으나[12,13], 본 연구에 사용된 석영 유리는 파장이 118-3,500 nm의 근적외선과 중적외선의 일부만을 통과시킬 수 있으므로 결과를 그대로 적용하기는 어렵다. 따라서, 석영 유리를 통과한 가시광 영역의 빛의 강도에 대하여 열전대로 측정된 온도와 비교하여 보았다.

본 연구에서는 먼저 산화제의 공급량이 1.8 l/min인 그을음의 발생이 없고 안정된 상태의 화염에 대하여 열전대로 화염의 온도를 측정된 결과와 SiC 필라멘트의 발광 강도를 8 비트( $2^8$ )로 디지털계수화한 결과와 비교하였다. Fig. 7이 그 결과이다. 여기에서 볼 수 있는 바와 같이 SiC 필라멘트의 발광 강도를 디지털 카메라로 찍어 그 분포를 도시한 그래프와 온도 계측의 결과를 반경방향으로 같은 위치에 두어 비교한 결과 화염 바깥쪽의 온도와 SiC 필라멘트의 발광 강도의 분포가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 물론 여기서는 두 관계의 보정이 이루어지지 않은 상태로 단순히 그 분포만 비교한 것이지만 SiC 필라멘트의 발광 강도가 온도를 잘 반영할 수 있다는 것을 알 수 있는 결과이다. 전임 연구자들의 결과와 비교하면 화염대 내부의 온도 분포는 열전대의 측정 결과보다는 SiC 필라멘트의 발광 강도의 분포가 더 온도를 잘 대변해 준다고 볼 수 있는 것이다. 이는 화염내 다른 위치에서의 비교에서도 잘 확인할 수 있다.

이 온도분포의 경향은 기존 연구자들의 계측결과와 일치한다. 또한, 화염 자체의 발광 강도를 도시한 결과와 비교하여 청염부에서 온도의 피크가 나타난다는 것도 확인할 수 있다.

이 결과를 참고로 하여 공기유량이 충분한 전형적인 확산화염의 그을음 생성 부분을 다시 확

인하였다. Fig. 8은 연소실을 제거한 상태의 전형적인 동축류 확산화염에서 노즐 상부 10mm 위치에 있는 SiC 필라멘트의 발광 강도의 분포와 9mm 위치의 화염의 수평방향으로 화염 자체의 발광 강도의 분포를 비교하여 본 것이다. 물론 화염 자체의 발광 강도는 화염의 중앙부에서는 화염의 반경 방향으로 적분된 강도가 나타나게 되나 화염대에 인접한 부분에서는 거의 단면 상태와 유사한 상태로 간주할 수 있다.

이 결과에서 SiC의 발광 강도의 분포 즉, 온도를 바로 반영하는 이 분포는 그늘음이 연소하는 밝은 화염 영역 바깥의 청염 영역에서 피크치를 가진다는 것을 알 수 있으며, 동시에 이 청염대의 안쪽면 즉, 밝은 황염과의 경계면에서 온도가 급격히 감소하고 있음을 보여준다.

여기서 주목할 것이 이 온도가 급격히 감소하는 위치에서, 화염 자체의 발광 강도 즉, 밝은 황염의 강도가 급격히 증가하고 있다는 것이다. 이 비교는 기존 연구에서 볼 수 없는 것으로 상당한 의미를 가진다. 다시 말하면, 청염대 내부에 존재하는 그늘음이 연소되는 밝은 노란색의 화염대에서 온도는 급격히 하강하고 있으며, 반면 그늘음의 발광 강도는 역으로 급격히 증가하고 있는 것이다. 이 영역은 전임 연구자들의 계측 결과에서 그늘음(soot)의 부착분율이 가장 큰 부분이다.

즉, 이 결과는 SiC 필라멘트의 그늘음 부착 결과에서 보듯이 그늘음의 생성이 가장 활발한 영역에서 온도가 급격히 감소하는 것으로 그늘음의 생성반응은 흡열반응이라는 데에 대한 실험적 증거로 내세울 수 있는 것이다.

이를 다른 위치에서 확인하여도 마찬가지이다. 즉, Fig. 9에서 같은 조건의 화염에서 SiC 필라멘트의 위치가 15mm, 화염 자체의 발광 강도를 노즐 위 14mm 위치에서 포착 한 결과에서도 밝은 노란색의 화염 영역의 바깥쪽 청염대에서

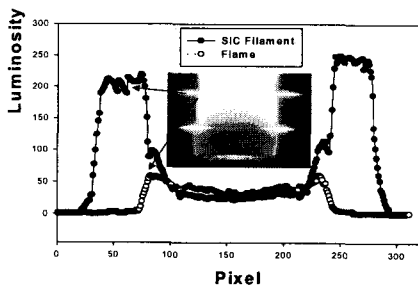


Fig. 8 Luminosity profiles of unconfined propane diffusion flame ( $Q_{fuel}=94.5cc/min$ ,  $Q_{air}=80.0l/min$ ,  $y=10mm$  for SiC filament,  $y=9mm$  for flame)

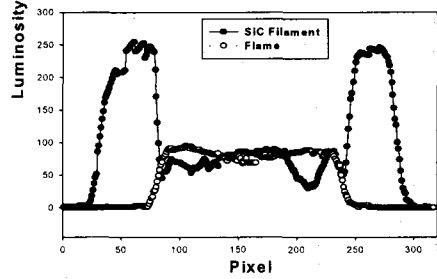


Fig. 9 Luminosity profiles of unconfined propane diffusion flame ( $Q_{fuel}=94.5cc/min$ ,  $Q_{air}=80.0l/min$ ,  $y=15mm$  for SiC filament,  $y=14mm$  for flame)

SiC의 발광 강도 즉, 온도가 가장 높고 그 경계면에서 발광 강도가 급격히 하강하고 있으며, 화염자체에서는 이 영역에서 그늘음의 발광강도가 급격히 증가하고 있다. 마찬가지로 이 위치에서도 그늘음의 생성반응은 상당한 열을 필요로 하는 흡열반응이라는 것을 보여준다.

이상의 결과에서 SiC 필라멘트를 이용하면 연소실로 제한된 화염에 대해서도 간단하게 그 영상을 획득하여 상대적인 온도 분포를 예측할 수 있음을 알았으며, 확산화염에서 반경 방향으로 화염대 근방의 온도 분포를 화염 자체의 발광 강도의 분포와 비교하여 그늘음의 생성과정이 흡열과정이라는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서 제한된 연소실내에 동축류로 산화제를 공급하는 층류 확산 화염에 대하여 산화제 유량의 변화에 따른 화염의 가시적 형태와 SiC 필라멘트를 이용한 발광 강도의 분포 형태 및 온도장과의 비교, soot의 부착형태를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 가시적 화염의 직접사진에서 동축류로 공급되는 산화제의 유량이 감소함에 따라, 그늘음이 연소하는 황염의 영역이 초기에는 증가하다가, 다시 감소하며 종국에는 거의 완전히 사라지고 투명한 청염이 지배적으로 된다. 그늘음의 발생도 초기에 그늘음의 꼬리가 화염의 바깥쪽 하류로 길게 이어지는 스모크가 나타났다가 더욱 산소가 결핍되게 되면 사라지고 그늘음의 연소에 의한 화염은 소멸된다.

2) 그늘음이 SiC 필라멘트에 부착되는 형태도 산화제가 충분한 경우에는 상류부에서 밝은 노란색 화염의 경계면에서 생성되기 시작하여 아주 좁은 영역에서 나타나고 하류부에서 화염을 가로질러 전 영역에서 부착되고 다시 산화되는 영역

으로 구분된다. 산화제가 감소하면, 그을음의 부착 범위가 넓어지면서 그 양이 급격하게 감소한다. 더욱 산소가 결핍 되면 그을음이 전혀 부착되지 않는다.

즉, 산소 결핍상태의 화염은 연소의 초기단계로 그을음을 생성하거나 연소하는 단계에까지 이르지 못한다는 것을 알 수 있었다. 이를 이용하면 연소 초기 착화단계의 반응에 대한 실험적 구명이 가능할 것으로 판단된다.

3) 화염의 내부 온도 분포에 대한 보다 세밀한 정보를 얻기 위하여 SiC 필라멘트의 발광 강도를 디지털 카메라로 획득하여 그 강도를 8 비트로 디지털 계수화 하여 열전대의 온도 측정 결과와 비교한 결과 SiC의 발광 강도가 그대로 상대적인 온도 분포를 잘 반영할 수 있음을 알았다.

이를 이용하여 산화제가 충분한 전형적인 확산화염에서 화염 제일 바깥쪽의 고온 청염대와 그을음의 발광강도가 급상승하는 황염의 경계면에서 온도가 급하강하는 것을 확인함으로써 화염내 그을음 형성 반응이 흡열 반응이라는 실험적 근거를 제시하였다.

### 후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 도움으로 진행되었으며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

[1] Glassman, I., "Combustion," 3rd ed., Academic Press, 1996., pp. 398-430.  
 [2] Richter, H., Howard, J. B., "Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Growth to Soot - A Review of Chemical Reaction Pathways," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 26, 2000, pp. 565-608.  
 [3] Makel, D. B. and Kennedy, I. M., "Soot Formation in Laminar Inverse Diffusion Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 97, 1994, pp. 303-314.  
 [4] Sunderland, P. B., K yl , U. O. and Faeth, G. M., "Soot Formation in Weakly Buoyant Acetylene-Fueled Laminar Jet Diffusion Flames Burning in Air," *Combust. Flame*, Vol. 100, 1995, pp. 310-322.  
 [5] Smyth, K. C., Shaddix, C. R. and Everest, D. A., "Aspect of Soot Dynamics as Revealed by Measurement of Broadband Fluorescence

and Flame Luminosity in Flickering Diffusion Flames," *Combust. Flame*, Vol. 111, 1997, pp. 185-207.

[6] Vander Wal, R. L., Jensen, K. A. and Choi, M. Y., "Simultaneous Laser-Induced Emission of Soot and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Within a Gas-Jet Diffusion Flame," *Combust. Flame*, Vol. 109, 1997, pp. 399-414.

[7] 이교우, 정영록, 정종수, "급속압입법에 의한 화염 내부 온도 분포 측정," *한국연소학회 논문집*, Vol. 4, No. 2, 1999, pp. 75-83.

[8] Böhm, H. and Lacas, F., "On Extinction Limits and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Formation in Strained Counterflow Diffusion Flames from 1 to 6 bar," *Proceedings of Combustion Institute*, Vol. 28, 2000, pp. 2627-2634.

[9] Walsh, K. T., Fielding, J., Smooke, M. D. and Long, M. B., "Experimental and Computational Study of Temperature, Species, and Soot in Buoyant and Non-buoyant Coflow Laminar Diffusion Flames," *Proceedings of Combustion Institute*, Vol. 28, 2000, pp. 1973-1979.

[10] Santoro, R. J., Yeh, T. T., Horvath, J. J. and Semerjian, H. G., "The Transport and Growth of Soot Particles in Laminar Diffusion Flames," *Combust. Sci. and Tech.* Vol. 53, 1987, pp. 89-115.

[11] Vilimpc, V. and Goss, L. P., "SiC-Based Thin Filament Pyrometry: Theory and Thermal Properties," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1988, pp. 1907-1914.

[12] Pitts, W. M., Smyth, K. C. and Everest, D. A., "Effect of Finite Time Response and Soot Deposition on Thin Filament Pyrometry Measurements in Time-Varying Diffusion Flame," *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1998, pp. 563-569.

[13] Blevins, L. G., Renfro, M. W., Lyle, K. H., Laurendeau, N. M. and Gore, J. P., "Experimental Study of Temperature and CH Radical Location in Partially Premixed CH<sub>4</sub>/Air Coflow Flames," *Combust. Flame*, Vol. 118, 1999, pp. 684-696.