

프로판 층류확산화염의 그을음 천이에 대한 형태학적 연구

심성훈* · 유창종** · 신현동***

Morphological Study on the Soot Transition in a Propane/Air Laminar Diffusion Flame

Sung Hoon Shim*, Chang Jong Yoo**, Hyun Dong Shin***

Abstract

The morphology of deposits on 15- μ m thin SiC filaments has been investigated with SEM in a co-flowing, propane/air laminar diffusion flame. The average size of mature soot particles deposited in the luminous flame edge is strongly dependent on their axial position in a typical heavily sooting flame. The surface growth of liquid-phase PAHs molecules and the transition to soots from fully-developed precursors could be observed in the radial deposition of the flame. Two sooting regimes were found: one is the transition from the condensed-phase precursors; the other is the aggregation of smaller soot particles (or chains of them) to be carried along particle path lines. In the high temperature flame edge outside the soot luminous flame surface, the very thin fiber-like structures, which are about 10 nm thick, were found.

Key Words: Soot, Soot Precursor, Deposits, SiC Filament, Diffusion flame, SEM(scanning electron microscope), PAHs

1. 서론

본 연구는 그을음의 생성과 성장에 관한 기존의 연구들에 기초하고 있다. 그을음의 전구물질로 알려진 PAHs 분자의 생성 및 표면성장, 그

을음의 초기 핵 형성, 입자의 성장, 산화에 대한 일련의 많은 연구들이 수행되었다[1-12]. 1991년에 Saito 등[13]은 여러 종류의 연료의 연소에서 발생하는 그을음을 직경 0.4mm의 석영 유리 침(quartz needle)의 표면에 부착시켜 전자현미경(SEM, scanning electron microscope)과 광학현미경을 이용하여 형태학적으로 분석하였다. 그는 사진을 게재하지는 않았으나 광학현미경을 통해 액적과 같은 형태의 전구물질의 표면

* 한국기계연구원 환경기계기술연구부

** 한국기계연구원 재료기술연구소 표면연구부

*** 한국과학기술원기계공학과

성장, 흑과 같은 형태의 초기 입자의 형성과 그을음으로의 성장과정을 기술하였다.

1997년에 Vander Wal 등[14]은 화산화염에 LIF(laser induced fluorescence)와 LII(laser induced incandescence)를 동시에 적용하여 그을음의 전구물질 즉, PAHs의 분포영역과 그을음의 생성영역의 사이에 신호가 동시에 약한 암흑 영역(dark zone)이 존재하며 이는 PAHs 분자의 표면 성장에 따라 수밀도(number density)가 감소함으로 인한 유도 형광신호의 약화와 그을음도 역시 초기 생성 영역에서의 수밀도가 낮아 백열신호가 약하게 된 때문인 것으로 설명하였다.

기존의 연구들은 대부분 그을음의 포집을 위해 석영 유리침, 금속 스크린, 열영동(thermophoretic) 방식을 이용하고 있다.[13,15-17]. 이 경우 삽입으로 인한 화염의 교란이 문제되거나, 또 포집 재료 자체를 통한 열전도 등으로 인한 촉매작용이나 산화의 우려로 인해 일정시간 이상 삽입시간을 증가시킬 수 없으므로 실제 포집된 그을음과 화염간의 정확한 위치 정보를 획득하기가 곤란한 점이 많았다. 또한, LIF나 LII를 이용한 농도 정보도 레이저의 강도나 광학계, 실험조건에 따라 그 감도(sensitivity)의 차이가 발생하여 다소간 다른 분포 형태를 보이므로 실제 화염에서 그을음의 시작점과 같은 위치정보가 정확히 수반되는 자료의 필요성을 절감하였다.

따라서, 본 연구에서는 화염대를 교란시키지 않고 열전도율이 아주 낮은 미세한 SiC 필라멘트를 이용하여 그을음과 그 전구물질의 부착에 의한 포집을 시도하였다. 본래 이 SiC 필라멘트는 화염의 온도를 측정하기 위한 목적으로 1988년 Vilimpoc와 Goss[18]가 제안한 이후로 많은 연구에 적용되고 있다[19,20]. 이 필라멘트는 Dow Corning Co의 상품명 β -SiC로서 직경은 $15\mu\text{m}$ 이며, 열전도도가 $10\text{ kcal/mhr}^\circ\text{C}$ 로, R-type 열전대(Pt/PtRh wire) 보다 약 40배 낮은 것으로 보고되어 있다. 이 필라멘트는 또한 산화 분

위기에서 비활성이며, 직경이 작아 자체내의 에너지 저장이나 축방향 전도에 비해 대류나 복사 에 의한 열전달이 훨씬 크게 되므로 시공간 분해능이 매우 좋은 재료로 알려져 있다. 즉 이 SiC 필라멘트는 화염 속에 삽입하여도 화염을 거의 교란시키지 않으며, 또한, 한번 부착된 그을음이 전도된 열이나 촉매작용에 의하여 그 형태가 변하지 않는 장점으로 인해 그을음의 포집용으로 사용하기가 매우 용이하다. 또한, 사진 판독을 통하여 화염 내에서의 정확한 2차원 위치정보를 얻을 수 있으므로 매우 유용한 자료가 될 수 있다. 본 연구에서는 화염 내에서 SiC 필라멘트에 부착된 모든 물질을 SEM을 이용하여 형태학적으로 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같다. 버너는 동축류로 공급되는 공기의 유동 균일화를 위해 하부에서부터 스크린과 세라믹 볼 및 세라믹 하니컴(honeycomb)을 배치하였고, 그 중앙에 황동제의 연료 노즐을 설치하였다. 연소실의 상부는 개방되어 있으며, 연료와 공기는 하류의 압력이 변화하여도 설정유량을 유지할 수 있는 질량유량조절기(MFC, mass flow controller)를 이용하여 공급하였다. 또한, 이들 모두 하류의 압력 맥동이 관내로 전달되어 불안정해지는 영향을 최소화할 수 있도록 완충 상자(surge box)를 통하여 공급되도록 하였다.

노즐은 내경 8mm, 외경 9mm의 것으로 노즐 출구부에서 발생하는 재순환 영역을 제거하기 위하여 두께를 최대한 얇게 가공하였다. 그을음의 포집을 위하여 9개의 SiC 필라멘트를 양쪽 끝에 무게를 달아 장력을 유지할 수 있도록 하여 노즐 출구부에서부터 5mm 간격으로 노즐의 중앙을 지나도록 설치하였다.

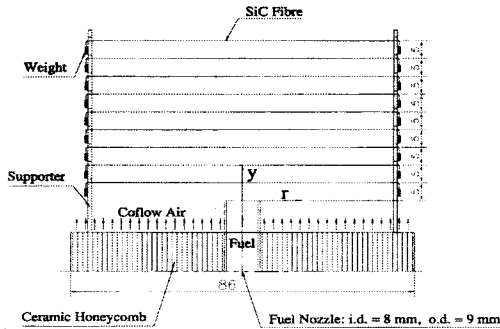


Fig. 1 Schematic of experimental setup

2.2. 실험방법

연료는 99.5% 순도의 프로판을 사용하였으며, 공급 유량은 $Q_{\text{fuel}} = 94.5 \text{ cc/min}$ (노즐출구 평균유속 $V_{\text{inj}} = 3.13 \text{ cm/s}$, $Re_f = 70$)으로 고정하였다. 이 연료 조건에서 안정된 전형적인 확산화염을 형성할 수 있도록 동축류로 공급되는 공기유량(Q_{air})을 이론 공기량(Q_{sto})에 대하여 $Q_{\text{air}}/Q_{\text{sto}} = 13.3$ 으로 유지되도록 충분한 양을 공급하였다.

화염과 함께 화염에서 생성되는 그을음이 SiC 필라멘트에 부착되는 형태를 촬영하고, 부착된 그을음은 SiC 필라멘트와 함께 전기 전도도를 높이기 위한 백금 입자 코팅 과정을 거쳐 전자현미경(SEM)으로 분석하였다. 한번 SiC 필라멘트에 부착된 그을음이나 전구물질들은 공기중에 장기간 방치하여도 그 형태가 변하지 않았다. 이는 기존 연구자들에 의해서도 보고된 바 있다[13]. 사용된 전자현미경은 JEOL사의 FESEM(field emission scanning electron microscope, 모델명 (JSM-6700F)로서 해상도는 15kV에서 1.0nm이며, 최소 25배에서 최대 650,000배의 확대 성능을 가진다.

그을음의 부착형태는 다시 2차원 LIF (laser induced fluorescence)와 레이저 산란을 이용하여 계측한 PAHs 및 그을음의 분포와 비교하였다. LIF는 활성기의 여기(excitation)를 위해

OPO (optical parametric oscillator, MOPO 730, Spectra Physics)를 펌핑하는 600mJ의 Nd : Yag 레이저 (GCR-200, Spectra Physics)를 사용하였다. 화염에서 발생하는 형광과 산란 신호는 적절한 필터를 거쳐 레이저광에 직각으로 설치된 ICCD 카메라 (intensified charge coupled Device, 576 × 384 pixels, Princeton Instruments)로 촬영하였다. 카메라는 레이저 펄스와 동기시켜 150ns로 게이팅(gating)되게 하였다.

PAHs의 형광신호는 보다 작은 분자까지 계측할 수 있도록 자외선 영역 즉, 본 연구에서는 OH radical의 여기 영역을 비껴난 282.98nm의 영역에서 여기 시켰으며 이보다 긴 파장대에서 넓은 범위(broad band)의 형광신호를 포착 (detection)할 수 있도록 레이저 영역을 차단하는 광학필터(WG-305)와 화염자발광 차단용의 광학필터(SPF-450)를 사용하였다[21].

그을음은 필터를 사용하지 않고 레이저의 탄성산란을 그대로 포착하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 확산화염에서의 그을음 생성

Fig. 2는 전형적인 안정된 동축류 확산화염에서 그을음이 SiC 필라멘트에 부착되는 형태를 보여주고 있다. 화염이 있는 (a)의 상태는 착화 후 3분대에 노출시간 1/50초로 촬영한 사진이며 (b)는 착화 후 5분대에 소염한 상태에서 그을음이 부착된 상태를 촬영한 것이다. 이 사진에서 보는 바와 같이 그을음은 축방향으로 노즐 위 5mm의 위치에서는 전혀 부착되지 않으며 10mm 위치에서부터 하류방향으로 점점 증가하고 있다. 축방향 20mm 까지는 밝게 빛나는 그을음 발광 화염대 (soot luminous flame zone)의 좁은 영역에서 그을음이 주로 생성되는 것을 볼 수 있으며 화염의 안쪽으로 아주 미세

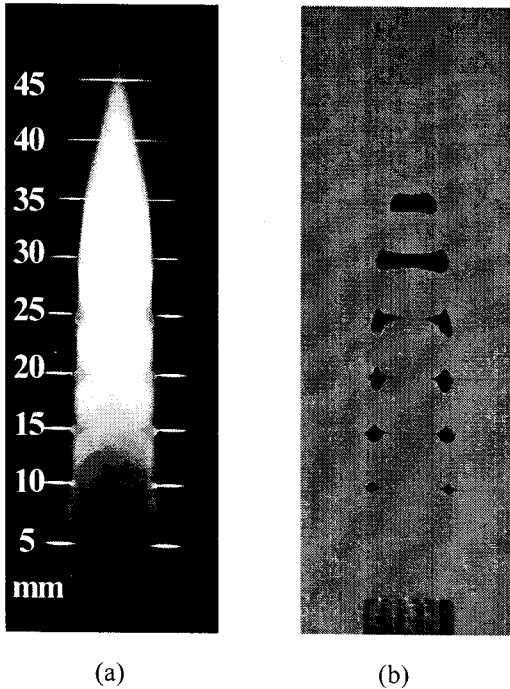


Fig. 2 Sooting aspect of typical diffusion flame. elapsed Time: (a) 3min (b) 5 min, after extinction($Q_{fuel} = 94.5cc/min$, $Q_{air}/Q_{Sto.} = 13.3$)

하게 증가한다. 그 이상 25mm에서부터 화염대의 중앙부에 그을음이 부착되기 시작하여 보다 하류인 35mm 위치까지는 화염전체에 걸쳐 그을음이 두껍게 부착되는 것을 확인 할 수 있다. 그 이상의 하류에서는 그을음이 산화되는 영역으로 더 이상그을음은 부착되지 않는다. 이와 같이 확산화염에서 그을음 생성영역의 구분은 기존의 연구와 일치한다[22-24].

Fig. 2-(b)의 그을음 부착형태를 보다 면밀히 관찰하면 그을음이 밝게 빛나는 화염대에서 가장 두껍게 형성된 그을음과 그 안쪽으로 부착된 그을음과의 사이를 구분하는 경계가 있음을 알 수 있다. 이는 25mm 위치에서 보다 뚜렷하게 보인다. 본 연구에서는 축방향 뿐만 아니라 반경방향으로도 SiC 필라멘트에 부착된 그을음(혹은 전구물질)을 육안으로 관찰되지 않는 부분까지 SEM으로 그 형태를 분석하였다.

3.2. 성장한 그을음 입자

SiC 필라멘트에 부착된 그을음 중 그을음 발광 화염대 부분에서 부착된 가장 두꺼운 부분의 그을음 즉, 완전히 성장한 그을음(mature soot)에 대하여 그림 Fig. 3과 같이 축방향 10, 20, 30mm 위치에서 SEM을 이용하여 40,000배의 배율로 분석하였다. 그림에서 보는 바와 같이 그을음입자의 평균 입경은 기존의 연구에서 보고된 바와 같이 약 50nm의 부근에 있기는 하나, 화염의 하류부로 갈수록 그 평균입경이 작아지고 있음을 알 수 있다. 즉, 완전히 성장한 그을음 입자는 축방향으로 하류로 가면서 산화되어 입경이 감소하는 것이다. 이는 Magaridis와 Dobbins[24]가 보고한 그을음의 축방향 변화의 일부로 볼 수 있다. 여기서 그을음의 입경은 20~90nm의 범위에 분포한다.

3.3. 그을음의 천이

Fig. 4는 노즐 위 20mm의 위치에 설치한 SiC 필라멘트에서 그을음 발광 화염대의 안쪽 부분, 즉, 제일 위의 그림에 표시한 부분을 각각 200배와 40,000배로 확대하여 촬영한 것이다. 중간의 그림에서 A 영역은 육안으로는 전혀 부착물의 유무가 확인되지 않는 부분이다. 그러나, 이 부분을 40,000배로 확대한 Fig. 4의 8을 보면 마치 액적이 뭉쳐있는 것 같은 형태가 화염의 반대편 대칭 위치에까지 분포되어 있다. 이 액적은 대략 1.5 μm 정도의 크기로 완전히 성장한 그을음의 입자에 비해 매우 크다. 즉, 이 형태는 그을음의 전구물질인 PAHs 분자의 응축상(condensed-phase)으로 표면성장에 의해 이와 같은 액적의 형태를 가지게 되는 것으로 보인다. 이 액적과 같은 부착물은 반경방향으로 화염대에 접근함에 따라 Fig. 4의 7과 같이 그 덩어리가 더욱 커지면서 돌기와 같은 형태가 나타나기 시작하면서 매끈한 표면이 사라진다.

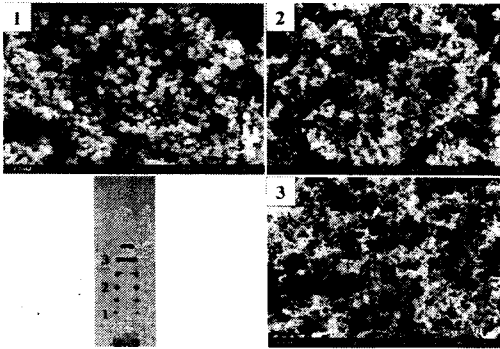


Fig. 3 Mature soots photographed at 40,000 \times by SEM, sampled in the outermost sooting zone $Q_{fuel} = 94.5\text{cc/min}$, $Q_{air}/Q_{sto.} = 13.3$, $y = (1) 10$, (2) 20, (3) 30 mm

이 대형의 덩어리는 6의 위치에까지 더욱 크게 성장하는 것을 알 수 있다. 표면에 생긴 돌기는 더욱 작은 돌기를 생성한다. 5의 위치로 접근하면서 표면에 작은 돌기가 형성된 대형의 덩어리는 초기의 액적보다 다소 작은 덩어리로 나뉘어진다. 이 작은 덩어리의 표면에 있는 돌기들은 4의 위치에서 나타난 형태와 같이 더욱 뚜렷하게 분화된다. 이 돌기들에서 다시 미세한 입자들이 형성되는 것이 3의 위치에서 나타나며 이 입자들은 2의 위치에서 비로소 그을음 입자의 형태를 가지게 된다. 이 입자들은 1의 위치로 접근하면서 거의 완전히 성장한 그을음 입자의 형태를 보여준다. 이 입자는 거친 구형으로 그 크기는 약 50nm 정도이다.

이와 같이 그을음의 입자는 액적 형태의 응축상을 가지는 성장된 전구물질에서 천이 되어 형성된다는 것을 알 수 있다. 또한, 화염의 중앙부에서는 응축상 전구물질의 형태에 변화가 없으나 화염대로 접근하면서 그을음으로 천이 되는 것으로 비추어 그을음의 형성과정에는 열이 필요하다는 것을 반증한다. 여기서는 개개의 입자들이 뭉쳐서 성장하는 형태의 그을음 생성기구는 관찰되지 않는다.

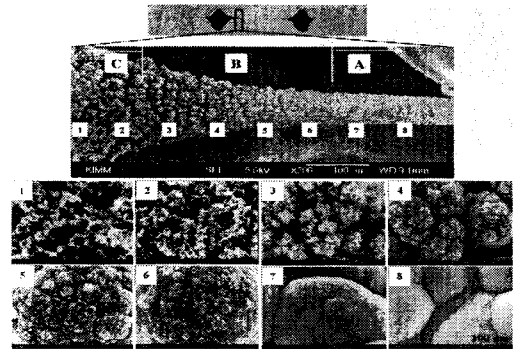


Fig. 4 Transition morphologies of deposits photographed at 200 \times and 40,000 \times by SEM, deposited on the inner flame region shown as the uppermost picture $Q_{fuel} = 94.5\text{cc/min}$, $Q_{air}/Q_{sto.} = 13.3$, $y = 20$ mm

3.4. 그을음 생성의 기구

그러나, Fig. 4의 축방향 위치보다 5mm 하류 부분인 $y=25\text{mm}$ 의 위치에서는 그을음의 생성 기구가 다소 다른 점을 보인다. Fig. 5는 이 위치에서 그을음이 생성되는 형태를 보여준다. 먼저, 그림에서 액적 형태의 응축상을 띄는 전구물질에서 천이 되어 그을음의 입자가 생성되는 기구는 앞의 Fig. 4에서 나타난 바와 같다. 그러나, 여기서 Fig. 5의 4에서 보는 바와 같이 응축상의 액적 형태의 표면에 아주 작은 섬유상으로 형성된 입자들이 부착되는 것을 볼 수 있다. 이 입자들은 화염의 상류에서 생성되어 입자 이동 경로(particle path line)를 따라 이동하여 온 것으로 판단된다[23]. 이는 다시 화염대로 접근하면서 3에서와 같이 응집하게 되고 2에서와 같이 응축상 전구물질로부터 천이 된 작은 덩어리들의 표면에 응집되어 성장한 그을음 입자의 덩어리가 형성된다. 중국에는 Fig. 5의 1에서와 같이 액적 형태의 응축상 전구물질에서 천이 된 그을음이나, 보다 미세한 그을음의 입자들이 응집하여 형성된 그을음은 모두 같은 형태의 그을음으로 성장하게 된다는 것을 알 수 있다.

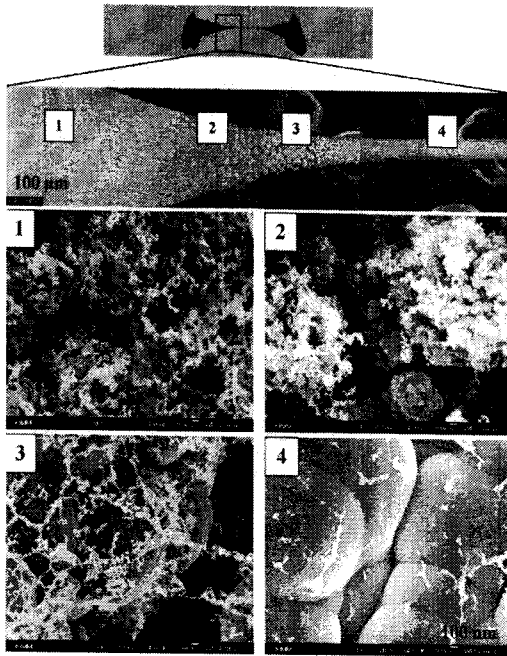


Fig. 5 Transition morphologies of deposits photographed at 200 × and 40,000 × by SEM, the uppermost picture $Q_{fuel} = 94.5cc/min$, $Q_{air}/Q_{sto.} = 13.3$, $y = 25mm$

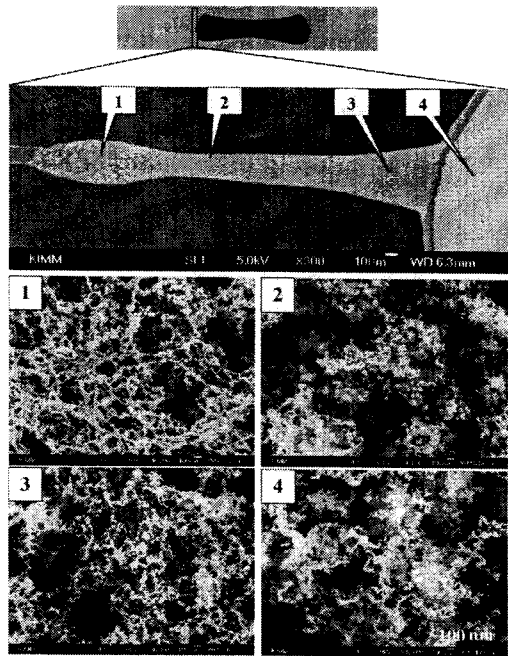


Fig. 6 Morphologies of deposits photographed at 300 × and 40,000 × by SEM, deposited on the outer flame surface shown in the uppermost picture $Q_{fuel} = 94.5cc/min$, $Q_{air}/Q_{sto.} = 13.3$, $y = 30mm$

즉, 이처럼 화염의 보다 하류에서는 그을음 입자의 형성에 두 가지 기구가 있는 것으로 설명할 수 있다. 첫 번째는 크게 표면 성장한 응축상 전구물질에서 천이 되어 생성되는 기구이고, 두 번째는 화염의 보다 상류에서 생성된 미세한 입자가 입자 유동 경로를 따라 하류로 이동하여 서로 응집하면서 그을음 입자로 성장하는 기구이다.

3.5. 그을음 입자의 산화

앞에서 설명한 바와 같이 그을음은 밝은 노란색의 화염대에서 전구물질로부터의 천이나 미세한 입자의 응집 과정으로 생성된다. 이렇게 성장한 그을음은 밝은 노란색의 화염대 바깥쪽 엷은 파란색을 띄는 고온의 반응대에 접근하

면서 산화된다. 이 부분을 SEM으로 300배 및 40,000배로 확대하여 분석한 것이 Fig. 6이다.

즉, 그을음 발광화염의 바깥쪽 부분에 육안으로는 관찰되지 않는 물질들이 반경방향으로 약 $300\mu m$, 그림의 1의 위치에서 두께 약 $11\mu m$ 로 부착되어 있음을 알 수 있다.

먼저, 그림에서 4의 부분을 보면 Fig. 3의 1에서 관찰한 바와 같은 완전히 성장한 그을음 입자의 크기보다는 작아졌음을 알 수 있다. 즉, 이 고온의 반응대에 인접한 부분에서 그을음의 산화가 진행되었다는 것이다. 이와 같이 그을음 입자의 크기는 그림에서 4, 3, 2의 위치 즉, 화염의 바깥쪽으로 가면서 감소함을 알 수 있다. 다만, 300배로 확대한 결과에서 보듯이 이 부분은 입자들의 분포가 상당히 고른(homogeneous) 양상을 보이고 있다.

그러나, 4의 위치 즉, 옅은 파란색의 고온 반응대의 바깥쪽 경계부분에서 형성된 부착물은 확연히 그 형태가 다르다. 우선 300배의 그림에서 이 부분은 여러 개의 핵을 중심으로 응집되어 서로 연결되는 구조를 가지는 것을 볼 수 있다. 이를 40,000배로 확대하여 보면 Fig. 6의 1에서와 같이 아주 미세한 섬유상의 조직으로 이루어졌음을 알 수 있다. 그 두께는 약 10nm이다. 이런 구조의 변화가 연소장에서 나타나는 것은 매우 중요한 의미를 가진다. 즉, 탄소섬유나 탄소나노튜브와 같은 구조의 형성 조건이 연소장에서 구현될 수 있다는 것으로 추후 보다 진전된 연구가 필요할 것이다.

3.6. 광학적 계측과의 비

여기서는 SiC 필라멘트에 부착된 그을음 부착형태와 레이저 산란을 이용한 그을음의 분포, 그리고 레이저 유도 형광법을 이용한 PAHs의 분포 양상을 비교하여 보았다. 그 결과를 나타낸 것이 Fig. 7이다. (b)는 그을음의 산란광, (c)는 자외선 영역에서 여기된 PAHs의 형광신호의 상대적인 분포를 나타낸 것이다. (b)는 일반적으로 잘 알려진 확산화염의 그을음 분포를 보여주고 있으며, (c)에서도 그을음 산란광 분포의 안쪽으로 그 전구물질로써 PAHs가 분포하는 잘 알려진 결과를 보여준다. 이 둘은 모두 화염대 내부에 분포한다.

그림에서 (a)와 (b)를 비교하여 보면 (a)에서 상류부의 화염대에서 최초로 그을음이 부착되는 부분은 $y=10$ mm 위치인데 비하여 (b)의 그을음의 산란광이 최초로 나타나는 위치는 약 $y=17$ mm의 위치이다. 즉, SiC 필라멘트에 부착될 정도의 그을음이 발생하는데도 산란광은 나타나지 않는다. 이는 산란에 사용되는 레이저광의 출력과 산란광을 감지하는 CCD의 감도(sensitivity)에 의한 것으로 판단된다. 즉, 그을음의 분포는 계측장치의 감도에 따라 다소 차이

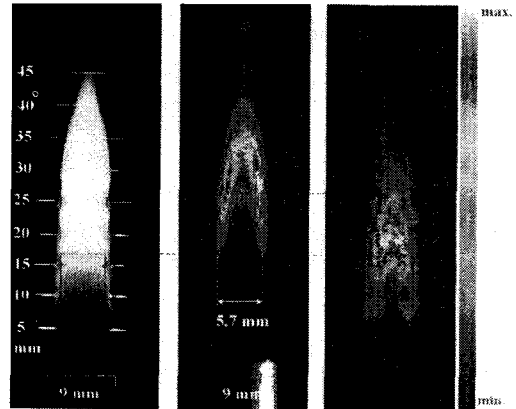


Fig. 7 Comparison of direct photograph of soot deposition (a) with soot scattering image (b), and PAHs fluorescence image (c) $Q_{fuel} = 94.5$ cc/min, $Q_{air}/Q_{sto.} = 13.3$

가 나타날 수 있음을 보여주는 결과이다.

다음 (c)에서 PAHs의 분포를 보면 $y=20\sim 25$ mm 위치에서 PAHs의 상대적인 농도는 반경방향으로 중앙부분에서 가장 강하고 화염대로 접근할수록 약해지고 있다. 그런데 그림의 (b)에서 그을음의 산란광도 PAHs의 형광과 접촉되는 부분에서 그 강도가 약해지는 것을 보여준다. 이를 앞의 Fig. 4에서의 천이로 인한 그을음의 생성과 비교하여 보면 PAHs 분자가 성장하여 대형 분자나 액적과 같은 응축상의 전구물질로 되면서 수밀도(number density)가 감소하면서 레이저에 의한 유도 형광의 발생이 약해지며, 그을음의 입장에서 전구물질에서 생성되는 초기 그을음의 수밀도가 이 위치에서 적기 때문에 산란광이 약해진다는 것으로 설명할 수 있다. 이는 1997년에 Vander Wal 등[14]이 보고한 바 있으나, 전구물질의 천이로 인한 형태학적 분석에서 더욱 명확히 설명할 수 있음을 보여주는 것이다. 마찬가지로 축방향의 변화에 대해서도 동일한 설명이 가능하다.

반면, 앞에서 반경방향의 중앙부분에는 액적 형태로 표면 성장한 대형의 응축상 전구물질이 분포되어 있는 것으로 설명하였는데 PAHs의

분포를 보면 중앙부에 여전히 형광신호가 강한 것을 볼 수 있다. 즉, 수밀도가 낮지 않다는 것이다. 이는 화염의 중앙부에서는 크게 성장한 응축상의 전구물질이 생성되기도 하지만 동시에 작은 기체상의 PAHs의 분자도 존재한다는 것을 의미한다. 즉, 연료 농도가 높은 중앙부에서는 작은 기체상의 PAHs 분자에서부터 크게 성장한 응축상의 전구물질이 같이 분포하는 것으로 설명할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 그을음이 생성되는 전형적인 동축류 층류 확산 화염에 대하여 SiC 필라멘트에 부착된 그을음과 그 전구물질의 SEM 분석, 그을음의 레이저 산란 계측 및 PAHs의 레이저 유도형광 계측을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 그을음 발광 화염대에서 SiC 필라멘트에 가장 두껍게 부착된 부분의 완전히 성장한 그을음 입자는 화염의 축방향으로 하류로 가면서 산화되어 입경이 감소한다. 그을음의 입경은 20~90nm의 범위에 분포한다.

2) 화염의 중앙부에서 1.5 μm 정도의 입경으로 성장한 응축상의 액적 형태를 띠는 전구물질은 반경방향으로 화염대에 접근하면서 돌기를 형성하고 더욱 분화되어 그을음 입자로 생성된다. 즉, 전구물질로부터 천이 되어 그을음입자로 되는 과정을 확인할 수 있었다. 이 천이는 화염대 근방에서만 나타나며 그을음의 생성이 열이 필요한 과정을 반증한다.

3) 화염의 하류부에서는 그을음 입자의 형성에 두 가지 기구가 나타났다. 첫 번째는 크게 표면 성장한 응축성 전구물질에서 천이 되어 생성되는 기구이며, 두 번째는 화염의 보다 상류에서 생성된 미세한 입자가 입자 유동 경로를 따라 하류로 이동하여 서로 응집하면서 그을음 입자로 성장하는 기구이다.

4) 그을음 발광 화염대 바깥쪽의 얇은 파란색의 고온 반응대에서는 그을음이 산화되어 입자가 더욱 작아진다. 반경방향으로 보다 바깥쪽의 경계면에서는 10nm 정도의 두께를 가지는 섬유상의 조직이 형성된다.

5) 레이저를 이용하여 그을음의 산란광과 PAHs의 유도형광을 계측한 결과에서 그을음의 초기 생성위치는 그을음 산란광의 계측 방법에 따라 다소 달라질 수 있으며, 그을음과 PAHs의 수밀도가 낮아지는 부분이 그 사이의 경계부에서 존재하는 것이 확인되었다. 또 화염의 중앙부분에서는 성장한 응축상의 전구물질과 작은 기체상의 PAHs분자가 동시에 존재하는 것으로 판단된다.

후 기

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

참 고 문 헌

- Graham, S. C., "The Collisional Growth of Soot Particles at High Temperatures," *Sixteenth Symposium(International) on Combustion*, 1977, pp. 663.
- Bittner, J. D., and Howard, J. B., "Composition Profiles and Reaction Mechanisms in a Near-Sooting Benzene/Oxygen/Argon Flame," *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, 1981, pp. 1105.
- Frenklach, M., Taki, S., Durgaprasad, M. B. and Matula, R. A., "Soot Formation in Shock-Tube Pyrolysis of Acetylene, Allene, and 1,3- Butadiene," *Combust and Flame*, Vol. 54, 1983, pp. 81.

4. Frenklach, M., Clary, D. W., Gardiner, Jr., W. C., and Stein, S. E., "Detailed Kinetic Modeling of Soot Formation in Shock-Tube Pyrolysis of Acetylene," *Twentieth Symposium on Combustion*, 1984, pp. 887.
5. Saito, K., Williams, F. A., and Gordon A. S., "Effect of Oxygen on Soot Formation in Methane Diffusion Flames," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 47, 1986, pp. 117.
6. Glassman, I., "Soot Formation in Combustion Processes," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, 1988, pp. 295.
7. Miller, J. H., "The Kinetics of Polynuclear Aromatic Hydrocarbon Agglomeration in Flames," *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*, 1990, pp. 91.
8. Venkatesh, S., and Saito, K., "Estimates on the Effect of Chlorine on the Global Soot Production Rates in Laminar Hydrocarbon-Air Diffusion Flames," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 85, 1992, pp. 297.
9. Puri, R., Moser, M., Santoro, R. J., and Smyth, K.C., "Laser induced Fluorescence measurements of OH · Concentrations in the Oxidation Region of Laminar, Hydrocarbon Diffusion Flames," *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion*, 1992, pp. 1015.
10. 황준영, 강경태, 정석호, 이원남, "동축류 확산화염에서의 매연 생성 특성에 관한 실험적 연구," 제12회 KOSCO Symposium 논문집, 1994, pp. 9.
11. 정종수, 이교우, 고범승, 강경태, "동축 이중 확산 화염의 매연 생성 특성," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집B, 1998, pp. 674.
12. Richter, H., and Howard, J. B., "Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Growth to Soot - A Review of Chemical Reaction Pathways," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 26, 2000, pp. 565.
13. Saito, K., Gordon, A. S., Williams, F. A., and Stickle, W. F., "A study of the History of Soot Formation in Various Hydrocarbon Diffusion Flames," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 80, 1991, pp. 103.
14. 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," *Combustion and Flame*, Vol. 109, 1997, pp. 399.
15. Dobbins, R. A., Fletcher, R. A., and Chang, H. C., "The Evolution of Soot Precursor Particles in a Diffusion Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 115, 1998, pp. 285.
16. Lee, K. O., Megaridis, C. M., Zelepouga, S., Saveliev, A. V., Kennedy, L. A., Charon, O., and Ammouri, F., "Soot Formation Effects of Oxygen Concentration in the Oxidizer Stream of Laminar Coannular Nonpremixed Methane/Air Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 121, 2000, pp. 323.
17. Starke, R., and Roth, P., "Soot Particle Sizing by LII During Shock Tube Pyrolysis of C₆H₆," *Combust and Flame*, Vol. 127, 2002, pp. 2278.
18. Vilimpec, V., and Goss, L.P., "SiC-Based Thin Filament Pyrometry: Theory and Thermal Properties," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, 1988, pp. 1907.

19. 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*, 1998, pp. 563.
20. 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 CH₄/Air Coflow Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 118, 1999, pp. 684.
21. Smyth, K. C., Shaddix, C. R., and Everest, D. A., "Aspects of Soot Dynamics as Revealed by Measurements of Broadband Fluorescence and Flame Luminosity in Flickering Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 111, 1997, pp. 185.
22. Smyth, K. C., Miller, J. H., Dorfman, R. C., Mallard, W. G., and Santoro, R. J., "Soot Inception in a Methane/Air Diffusion Flames as Characterized by Detailed Species Profiles," *Combustion and Flame*, Vol. 62, 1985, pp. 157.
23. 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. Technol.*, Vol. 53, 1987, pp. 89.
24. Megaridis, C. M., and Dobbins, R. A., "Soot Aerosol Dynamics in a Laminar Ethylene Diffusion Flame," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, 1988, pp. 353.