

[Research Paper]

대기 조성 치환 및 압력이 Jet A1 액적 화염의 매연 입자 생성에 미치는 영향에 관한 연구

남원식 · 류명호 · 이종원* · 박설현**†

조선대학교 대학원 기계시스템·미래자동차공학과 대학원생, *한국항공우주연구원 기술연구본부 미래융합연구부 연구원,
**조선대학교 기계시스템·미래자동차공학부 교수

Effects of Atmospheric Composition Substitution and Pressure on Soot Formation of Jet-A1 Droplet Flames

Won-Sik Nam · Myung-Ho Ryu · Jong Won Lee* · Seul-Hyun Park**†

Graduate Student, Dept. of Mechanical System & Automotive Engineering Graduate School of Chosun University,
*Researcher, Future & Converging Technology Research Division, Technology R&D Head office, Korea Aerospace Research Institute (KARI)

**Professor, School of Mechanical System & Automotive Engineering, Chosun University

(Received October 16, 2019; Revised October 20, 2019; Accepted October 21, 2019)

요 약

본 연구에서는 한국형발사체와 유사한 작동환경에서 Jet A1 액체연료의 매연 입자특성에 대해 농도를 측정함으로써 그 결과를 고찰하였다. 발사체환경과 유사한 대기 조건을 모사하기 위해 연소챔버의 산소 농도를 30%로 유지하고 내부 압력을 0.06 MPa에서 0.1 MPa 까지 변화시켜가며 실험을 통해 수행하였고, 대기의 조성을 질소, 헬륨, 이산화탄소 가스로 치환하여 실험을 수행하였다. 직경이 2 mm인 Jet-A1 액적에 동일한 점화에너지를 인가하여 발생 되는 매연 입자의 농도를 전역 광소멸 기법을 이용하여 측정하였다. Jet-A1 액적 화염의 매연 입자입자의 농도는 모든 압력조건에서 대기의 조성이 질소로 치환된 경우 높았으며, 이산화탄소로 치환된 경우 가장 낮았다. 압력이 낮아질수록 매연의 입자농도가 감소하였고, 대기압력의 P^n 형태로 감소하는 경향을 확인하였다.

ABSTRACT

In this study, the soot formation characteristics of Jet-A1 liquid fuel droplet flames were investigated by measuring the soot concentration under atmospheric conditions similar to the working environment of the Korea Space Launch Vehicle (KSLV) To obtain the desired atmospheric conditions, the oxygen concentration in the combustion chamber was maintained at 30% and the pressure was varied between 0.1 and 0.06 MPa. The full-field light extinction technique was used to measure the concentration of soot particles generated by applying the identical to 2-mm-diameter Jet-A1 fuel droplets. The soot concentration of the Jet-A1 droplet flames was the highest in the nitrogen-substituted atmosphere and the lowest in the carbon dioxide-substituted atmosphere, despite the pressure. the pressure was decreased the measured soot concentrations reduced as a function of P^n .

Keywords : Soot, Concentration Jet-A1, Full-field light extinction method

1. 서 론

화재 인명사고의 대부분은 연기의 매연(Soot) 입자 흡입으로 인한 것으로 잘 알려져 있다⁽¹⁾. 아울러 화재 시 발생

하는 연기 매연 입자는 피난 경로의 가시도를 낮추고 강한 열복사 특성은 연료의 열분해 과정에 영향을 미쳐 구획 내부의 열화학적 변화를 초래할 수 있다. 특히, 매연 입자의 배출이 대기오염의 원인으로 지목되고, 연소기 수명향상을

† Corresponding Author, E-Mail: isaac@chosun.ac.kr. TEL: +82-62-230-7174, FAX: +82-62-230-7171

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

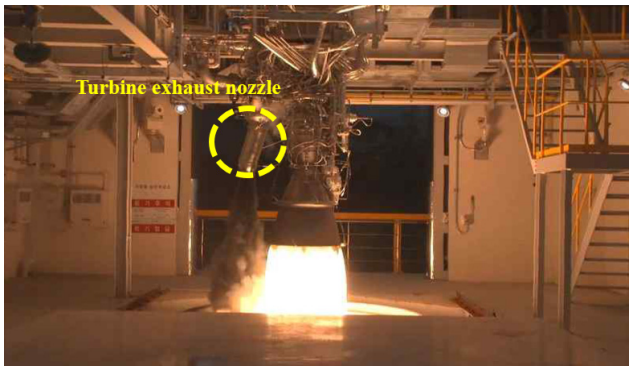


Figure 1. Engine test soot emitted from Korea Space Launch Vehicle (KSLV) II⁽¹⁰⁾.

위해 매연 입자 저감에 대한 필요성이 대두됨에 따라 다양한 연소환경에서 생성되는 매연 입자의 농도측정에 관한 연구⁽²⁻⁵⁾가 활발하게 이뤄지고 있다.

탄화수소계 연료의 연소과정에서 생성되는 매연 입자는 연소 시스템의 압력과 온도에 대한 의존성이 높은 것으로 알려져 있다. Flower와 Bowman⁽⁶⁾은 에틸렌 확산화염의 매연생성에 대한 압력의 영향을 실험적으로 연구하였으며, 매연 입자의 농도변화는 압력과 n 제곱 상관관계로 도시할 수 있음을 보고한 바 있다. Lee는 에틸렌 및 프로판 층류 확산화염을 이용하여 유사한 경향을 확인하였다⁽⁷⁾. 연소과정에서 매연 입자의 생성과 성장은 주로 Hydrogen abstraction carbon addition (HACA) 메커니즘을 바탕으로 아세틸렌(C_2H_2)과 벤젠(C_6H_6)의 생성과 Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)로의 성장에 초점을 맞추어져 있는데, 이 과정에서 화염온도가 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다^(4,5,8). 하지만 선행 연구^(8,9)에 의하면 매연 입자의 생성은 화염 온도와 비례하여 증가하지 않고, 대략 1700~1900 K 온도를 넘어서면 PAH의 불안정(Instability)을 야기하여 오히려 매연 입자의 생성은 줄어드는 것으로 보고된 바 있다.

Figure 1은 한국형 시험 발사체(Test launch vehicle, TLV)의 연소 시험과정으로, 터빈 배기노즐(Turbine exhaust nozzle)에서 많은 양의 매연이 배출되는 것을 확인할 수 있다. 이는 고압의 터빈을 구동시키기 위해 Jet A1 액체연료를 연소시키는 가스발생기에서 다량의 매연이 발생하고 터빈 배출기 노즐을 통해 방출되기 때문이다. 시험 발사체의 경우 연료는 등유계 항공유인 Jet A1을 산화제로는 액체산소(LOx)를 사용하고, 연료나 산화제의 가압을 위한 기체로 헬륨과 질소와 같은 불활성 기체를 사용한다. 앞서 언급한 것처럼, 발사체의 작동 과정 중 생성되는 매연은 엔진의 효율과 내구성에 영향을 미치게 되고, 발사체 엔진의 성능 향상을 위해서는 주어진 연소환경에서 매연 저감 기술 개발이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 기술 개발의 일환으로 한국형 발사체의 작동 환경과 유사한 환경에서 Jet A1 액체 연료의 연소과정에 생성되는 매연농도 측정에 관한 실험을 수행하였다.

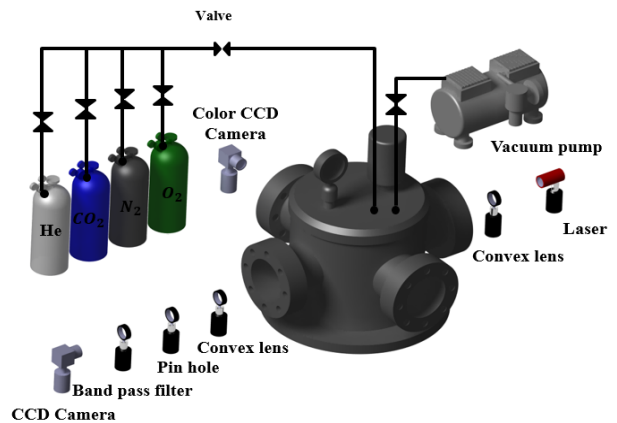


Figure 2. Schematic diagram of an experimental setup.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 한국형 발사체와 유사한 작동환경을 고려하기 위해 첫 번째로 고려한 실험 인자는 연소압력이다. 발사과정에서 발사체의 고도가 상승함에 따라 동체 내부의 압력은 대기압보다 낮아지기 때문에 연소실 내부의 압력을 대기압 이하로 낮추어 가며 실험을 수행하였다. 또한, 발사체에서 액체산소의 가압제로 사용되는 질소와 헬륨가스로 산소와 희석하여 대기 조성을 치환하였다. 다만 화재 및 폭발사고의 억제 및 진화 관점에서는 이산화탄소 가스를 추가하여 총 세 가지의 가스로 대기를 조성하였다.

Figure 2는 한국형 발사체와 유사한 작동환경을 모사하기 위해 제작된 연소챔버와 각종 실험장치의 구성을 보여주는 개략도이다. 실험장치는 그림에 나타난 바와 같이 크게 약 10 L 체적의 연소챔버, 진공펌프, 전역 광소멸 장치와 CCD Camera 등으로 구성되어 있다. SUS304 재질의 연소챔버는 다양한 설정 압력 범위(0.06 MPa~0.10 MPa)에 맞게 산소, 질소, 이산화탄소, 헬륨 등의 산화제와 희석제를 챔버 내부에 주입할 수 있게 설계되었으며, 2쌍의 광학창이 각각 평행하게 설치되어 Jet-A1 액체의 연소 시 생성되는 매연의 농도와 실리카 섬유의 복사 강도를 측정할 수 있도록 구성하였다.

연소챔버 내부에는 Figure 3과 같이 섬유의 중앙에 난연성 재질인 실리카 섬유를 설치하고 그 위에 액체연료인 Jet-A1을 액적 형태로 부착시켜 점화를 시켰다. 실험에 사용된 실리카 섬유의 경우 열관성이 매우 낮고 두께가 얇아 화염의 온도와 열평형이 빠르게 이루어질 수 있으며, 고온에 노출된 경우 화염의 온도에 비례하여 발광하게 된다. 본 연구에서는 실리카 섬유의 밝기 즉 복사 강도를 CCD 카메라를 통해 측정하고 화염의 온도를 간접적으로 예측하였다. 또한, 연료의 양에 따른 영향을 최소화하기 위하여, 모든 실험에는 실리카 섬유에 맺힌 액적의 초기 지름은 2 mm로 고정하여 실험을 진행하였다. 액적의 점화 방식은 니크롬선에 특정 전압과 전류를 인가하여 가열시키는 줄 히팅(Joule heating)을 이

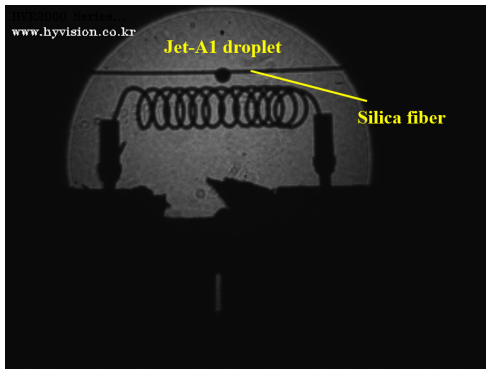


Figure 3. Full field light extinction image of Jet-A1 liquid droplet deployed on the Silica fiber.

용하였다. 점화 초기 니크롬선에서 가해지는 에너지에 따라 액적 연소율이 달라지는 것을 방지하기 위해 모든 실험 조건에서 동일한 점화에너지를 인가하였다.

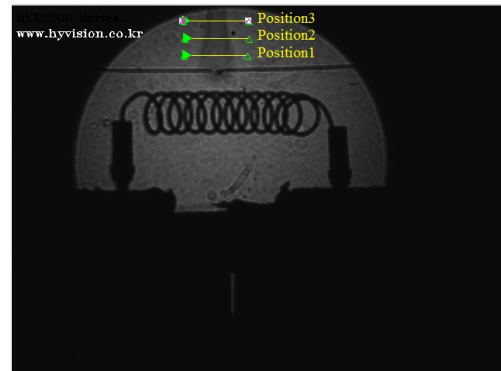
연소챔버 내부의 산소농도와 대기의 조건은 챔버 내부를 진공까지 감압 후 식 (1)의 돌핀의 분압법칙을 이용하여 해당 가스를 일정한 압력으로 분압하여 공급하였다. P_{O_2} 와 P_{He} or N_2 or CO_2 는 각각 연소챔버 내에서 산소와 희석제의 분압을 의미한다. 실험에는 사용되는 대기 조성 변경을 위해 사용한 가스는 질소, 헬륨 및 이산화탄소이며, 챔버의 압력이 낮아지는 경우 더 많은 점화에너지를 필요하므로⁽¹¹⁾ 본 연구에서는 점화성을 개선하기 위해 모든 실험에서 산소농도를 30%로 고정하였다.

$$O_2 [mole\%] = \frac{P_{O_2}}{P_{O_2} + P_{He \text{ or } N_2 \text{ or } CO_2}} \quad (1)$$

매연 입자의 농도를 측정하는 대표적인 방법으로는 열전대 입자 계측법, 레이저유도백열법(Laser-induced incandescence), 전역 광소멸 기법(Full-field light extinction)이 있다. 열전대 입자 계측법은 확산화염 내부에 열전대를 삽입하여 열전대와 고온인 화염의 온도 구배가 발생하면, 매연 입자들은 열영동(Thermophoresis) 현상에 의해 매연이 열전대에 부착되는 성질을 이용한 방법이나, 열전대로의 부착은 열영동 현상에 의해서만 일어난다는 전제 조건이 있어, 매우 제한되는 조건에서만 측정할 수 있다는 단점이 있다. 레이저유도백열법은 측정 대상 부의 매연 입자에 고에너지 밀도의 펄스 레이저를 짧은 시간 동안 조사하여, 매연 입자가 고온으로 가열되는 과정 이후, 냉각되는 과정을 통해 방출되는 LII신호를 측정하는 방법이다. 즉, 매연 입자로부터 방출되는 흑체복사 강도를 나타내는 LII신호가 매연 입자의 농도에 비례한다는 현상을 이용하여 매연 입자의 농도를 측정하는 방법이다. 이 방법은 매우 고효율 레이저가 필요하며, 레이저의 높은 에너지 밀도로 인해 발생한 매연 입자의 탄소 구조가 변형될 수 있다는 단점이 있다⁽¹²⁾. 광 소멸법은 화염에 빛을 투과시키면 화염 내의 매연 입자에 의해 빛



(a) Flame image



(b) Full field light extinction image

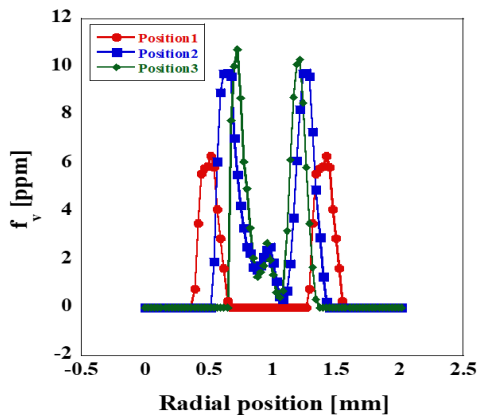
Figure 4. Flame and visualized soot particle images obtained from burning in 30% O_2 in N_2 at 0.1 MPa.

일부가 소멸하게 되는데, 여기서 빛의 소멸 정도는 매연의 체적에 비례하므로 빛의 소멸 정도를 측정하여 매연의 농도를 얻는 방법으로, 일반적으로 확산화염 매연농도를 측정할 때 자주 사용된다. 본 연구에서는 전 역광소멸법을 이용하여 화염 내부의 매연 입자농도 및 공간 분포를 측정하였다. 전역 광소멸 기법을 이용한 매연 입자농도 측정원리 및 절차는 참고문헌⁽¹³⁾에 잘 정리되어있다.

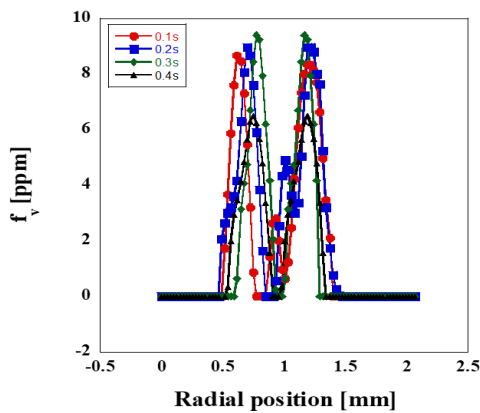
3. 실험결과 및 고찰

Figure 4(a)는 연소실의 압력은 0.1 MPa, 질소 대기환경에서 산소농도 30% (30% O_2 in N_2)로 유지시킨 상태에서 점화 0.3 s 후 획득된 Jet A1 액적화염과 전역 광소멸 이미지를 통해 화염 내에 생성된 매연을 가시화한 결과이다. 전역 광소멸 이미지에서 관찰할 수 있는 바와 같이 매연입자는 화염 면을 따라 생성되며, 화염의 형상과 유사한 형태로 분포되어있는 것을 확인할 수 있다.

Figure 5(a)와 5(b)는 Figure 4(b)의 전역 광소멸 이미지에 표시된 세 지점(실리카 섬유로부터 위쪽 방향으로 5 mm 간격 높이를 증가)의 가장 왼쪽을 원점으로 설정하고 반경 방향으로 측정된 매연입자 농도 분포를 도시한 그래프이다. Figure 5(a)에는 점화 0.3 s 후, 각 높이 별로 측정된 매연입



(a) Soot concentration distribution above the silica-fiber



(b) Temporal soot concentration distribution

Figure 5. Temporal and spatial soot concentration measured from burning in 30% O₂ in N₂ at 0.1 MPa.

자의 농도 분포이며, Figure 5(b)는 지점 3(Position 3)에서 점화 직후 0.1 s~0.4 s 사이에 측정된 매연 입자의 농도분포 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 상단으로 갈수록 화염 폭이 줄어드는 것과 동일하게 매연 입자 공간 분포의 폭도 감소하는 반면 측정된 매연 입자의 농도는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 아울러 점화 직후 시간이 지남에 따라 매연입자의 농도가 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이는 점화 이후 액적이 감소함에 따라 화염 면으로 공급되는 연료량이 줄어들면서 화염 온도가 낮아지기 때문으로 판단된다.

본 연구에서는 Figure 5의 결과를 바탕으로 각 실험 조건에서 최고 매연입자 농도($f_{v, \max}$)를 결정하였다. Figure 5의 결과를 예로 들면 지점 3 (Position 3)에서 점화 0.3 s 후 최대 농도 값이 관찰되었고 Figure 6과 같이 도시하여 최종적으로 각 실험 조건 별 최고 매연입자 농도를 결정하였다.

Figure 7은 각 대기조성(산소/헬륨, 산소/질소, 산소/이산화탄소)환경에서 매연 입자농도를 측정된 결과를 도시한 그래프이다. 동일한 압력(0.1 MPa)과 산도 농도(30%)에 실험을 수행한 결과임에도 불구하고 산소에 혼합한 가스의 종류에 따라 매연 입자농도가 다른 것을 알 수 있다. 측정된 매연의

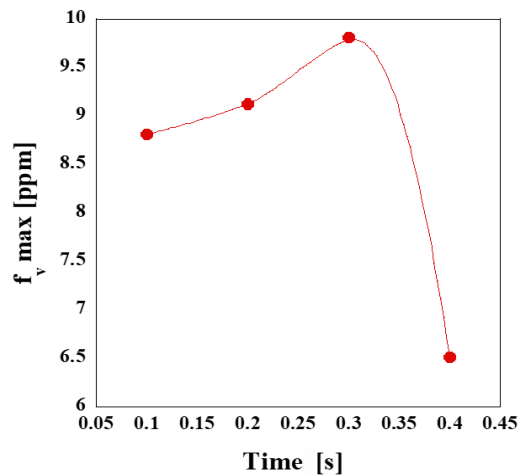


Figure 6. Determination of maximum soot concentration for Jet Al droplet flame.

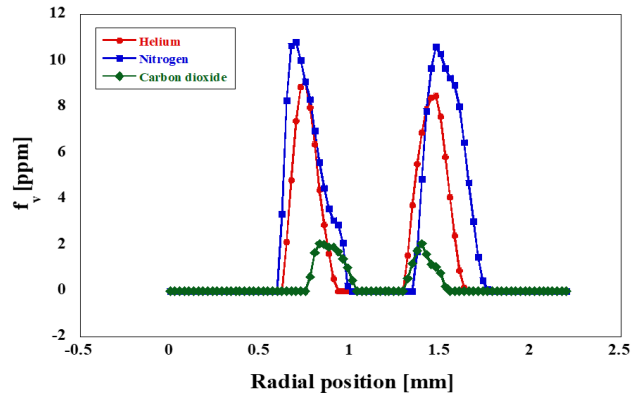


Figure 7. Measured soot concentration in 30% O₂ in N₂, He and CO₂ at 0.1 MPa.

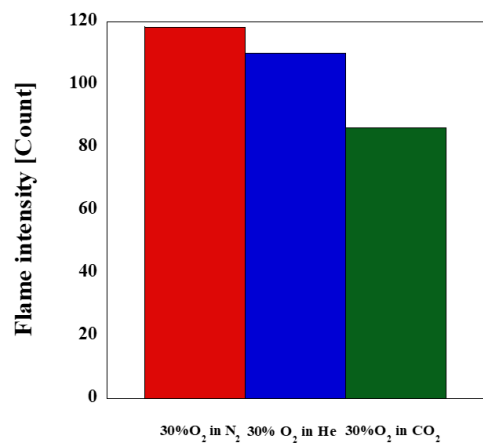


Figure 8. Measured radiant intensity emitted from the silica-fiber.

입자농도는 대기 조성이 질소로 치환되었을 때 가장 높았으며, 헬륨, 이산화탄소 순서로 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

Figure 8은 대기 조성 치환 시 달라지는 매연 입자의 농

Table 1. Summary of Specific Heat and Thermal Conductivity for Gas at 298.15 K

Specific Heat [J/mol*K]			Thermal Conductivity [W/m*K]				
Pressure [MPa]	Nitrogen	Carbon Dioxide	Helium	Pressure [MPa]	Nitrogen	Carbon Dioxide	Helium
0.06	29.15	37.32	20.78	0.06	0.026	0.017	0.16
0.08	29.16	37.38	20.78	0.08	0.026	0.017	0.16
0.10	29.17	37.44	20.78	0.10	0.026	0.017	0.16

도변화를 설명하기 위해 CCD 카메라를 이용하여 측정된 실리카 섬유의 복사강도를 도시한 그래프이다. 실험에 사용된 실리카 섬유는 두께가 매우 얇고, 열관성이 낮아 섬유 위에 발생된 화염과 비교적 빠르게 열평형을 이룰 수 있고, 특정 파장에서 화염 온도와 실리카 섬유의 복사 강도는 플랑크 복사 법칙(Planck's law)에 의해 비례 관계가 성립한다. 본 연구에 사용된 실리카 섬유는 흑체는 아니지만, 고온에서 방사율이 비교적 일정하기 때문에⁽¹⁴⁾ 650 nm 파장 대역에서 측정된 복사강도의 크기로 화염 온도의 높고 낮음을 판단하였다⁽¹⁵⁾. 대기의 조성이 질소 가스로 치환된 경우 화염 온도가 가장 높고 이산화탄소로 치환된 경우 가장 낮은 것으로 판단된다. 이 결과는 Park⁽¹⁶⁾ 연구를 보면 알 수 있듯이 에탄올 액적 화염에서 보고한 바와 같이 치환된 가스의 비열과 열전도계수로 설명할 수 있다. 즉, 대기의 조성이 단원자 가스인 헬륨으로 치환된 경우, 가장 낮은 비열로 인해 단일 화염온도가 가장 높고 비열이 가장 큰 이산화탄소(Table 1)로 치환된 경우 단일 화염온도가 가장 낮다. 하지만 다른 가스에 비해 월등히 큰 헬륨 가스의 열전도 계수로 인해 화염 면에서 주위로 전도 열손실이 증가하고 이로 인해 대기 조성이 질소 가스로 치환된 경우에 비해 화염 온도가 감소할 수 있다. 결국 대기 조성이 질소 가스로 치환되었을 때 가장 높은 화염 온도로 인해 측정된 매연의 농도가 가장 높고, 이산화탄소 가스로 치환되었을 때 낮은 화염온도로 인해 매연의 농도가 감소한 것으로 판단된다.

대기의 조성이 각각 질소, 헬륨, 이산화탄소 가스로 치환될 경우 대기압의 변화가 매연 생성에 미치는 영향을 고찰해 보기 위해서 연소챔버의 압력을 0.1 MPa에서 0.06 MPa로 감소시켜 최고 매연 농도를 동일한 실험 조건에서 각각 3회 측정하고 평균값의 결과를 Figure 9에 도시하였다. 결과를 보면 연소챔버의 압력이 감소할수록 최고 매연농도는 감소하였고, 특히 대기 조성이 이산화탄소로 치환된 경우 압력이 0.09 MPa 이하로 감소한 경우 전역 광소멸 기법을 이용하여 매연농도를 측정할 수 없을 만큼 감소하였다. 압력이 감소하면 산소의 확산 속도가 빨라져 매연 입자의 산화가 촉진되어 매연농도가 감소할 수 있으며⁽⁷⁾, 매연 입자의 선행 화학종으로 알려진 아세틸렌이나 벤젠의 형성이 억제되어 매연 입자의 생성이 줄어드는 것으로 판단된다.

식 (2)에는 대기 조성이 질소, 헬륨, 이산화탄소 가스로 치환된 경우 측정된 매연농도와 대기압의 상관관계를 P^n 으로

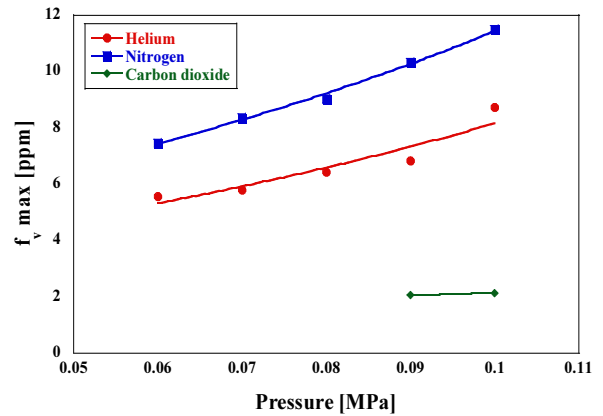


Figure 9. Measured soot concentration as a function of atmospheric pressure for 30% O₂ in N₂, He and CO₂.

나타내었다. 대기 조성이 헬륨 가스로 치환된 경우 압력변화의 의존이 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 질소나 이산화탄소 가스에 비해 헬륨 가스의 높은 물질 확산 계수(Mass diffusivity)가 산화제의 확산에 영향을 미치기 때문이라고 사료된다.

$$\text{Nitrogen } f_{v,max} \propto P^{0.815}$$

$$\text{Helium } f_{v,max} \propto P^{0.835}$$

$$\text{Carbon dioxide } f_{v,max} \propto P^{0.392} \tag{2}$$

4. 결론

본 연구에서는 한국형발사체의 연료로 사용되는 Jet A1을 이용하여 액적 화염을 생성시키고 발생하는 매연 입자의 농도를 측정하였다. 특히 발사체 환경과 유사한 대기 조건을 모사하기 위해 연소챔버의 산소 농도를 30%로 고정하고 대기의 조성을 질소, 헬륨, 이산화탄소 가스로 치환하였다. 아울러 연소챔버 내부에 직경이 2 mm인 Jet A1 액적을 생성시켜 0.06 MPa에서 0.1 MPa 사이의 압력조건에서 니크롬선의 점화를 통해 확산화염을 발생시켰고, 화염 내부에 발생한 매연농도를 측정하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) Jet-A1 액적 화염의 매연 입자의 농도는 모든 압력조건에서 대기의 조성이 질소로 치환된 경우 높았고, 이산화

탄소로 치환된 경우 낮았다. 이는 질소로 치환된 경우 화염 온도가 가장 높고 이산화탄소로 치환된 경우 화염의 온도가 가장 낮기 때문이다.

2) 대기압이 낮아질수록 실험에 사용된 대기 조성 치환 조건에서 측정된 최고 매연농도는 대기압, Pⁿ의 상관관계로 감소하였다,

3) 특히 헬륨가스로 대기 조성이 치환된 경우 최고 매연농도 감소가 압력 의존성이 높았으며 이는 헬륨 가스의 높은 물질 확산 계수 때문으로 판단된다.

References

1. J. H. Kim, B. S. Do and S. B. Lee, "The Clinical Aspects of Toxic Smoke Inhalation Injury in The Closed Space", *Korean J. Burn*, pp. 6-10 (2004).
2. H. G. Kang, "Experimental Study on Soot Formation of Laminar Diffusion Flames : The Effects of Fuel/Air, Fuel Mixture and Pressure", Master's Thesis, Dankook University (1997).
3. C. J. Dasch, "One-Dimensional Tomography: a Comparison of Abel, Onion-Peeling, and Filtered Backprojection Methods", *Applied Optics*, Vol. 31, No. 8, pp. 1146-1152 (1992).
4. I. Glassman, "Sooting Laminar Diffusion Flames: Effect of Dilution, Additives, Pressure, and Microgravity", In *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 27, No. 1, pp. 1589-1596 (1998).
5. O. L. Gulder and D. R. Snelling, "Influence of Nitrogen Dilution and Flame Temperature on Soot Formation in Diffusion. Flames", *Combust and Flame*, Vol. 92, pp. 115-124 (1993).
6. W. L. Flower and C. T. Bowman, "Soot Production in Axisymmetric Laminar Diffusion Flames at Pressures from One to Ten Atmospheres", In: *Symposium (International) on Combustion*, pp. 1115-1124 (1988).
7. W. N. Lee, "The Effects of Pressure on PAH and Soot Formation in Laminar Diffusion Flames", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B*, Vol. 22, No. 10, pp. 1445-1453 (1998).
8. S. H. Park and M. Y. Choi, "Influences of Residence Time of Fuel Vapor Transport on Sooting Behavior of Ethanol Droplet Flames in Microgravity", *Microgravity Science and Technology*, Vol. 27, No. 5, pp. 337-344 (2015).
9. M. Frenklach, D. W. Clary, W. C. Gardiner Jr and S. E. Stein, "Detailed Kinetic Modeling of Soot Formation in Shock-tube Pyrolysis of Acetylene", In *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 20, No. 1, pp. 887-901 (1985).
10. S. H. Kim, S. R. Kim, S. H. Kim, C. H. Kim, D. B. Seo, S. P. Woo, B. I. Yu, Y. S. So, et al., "Current Status of Development Test of 75 tonf Engine System for KSLV-II", *Proceedings of the 2017 KSPE Spring Conference*, The Korean Society of Propulsion Engineers. pp. 99-103 (2017).
11. H. J. Kwon, "Study of Minimum Ignition Energy Measurements for Jet A1 Liquid Fuel and Characteristics of Flame Spread for Solid Fuel under Elevated Oxygen Concentrations and Reduced Atmospheric Pressures", Master's Thesis, Chosun University (2017).
12. S. H. Kim, "A Study on The Soot Volume Fraction in Various Flickering Flames Using Laser Induced Incandescence", Master's Thesis, Pusan National University (2007).
13. M. H. Ryu, "A Study of the Concentration Measurements of Soot Particles Formed Within Diffusion Flames", Master's Thesis, Chosun University (2016).
14. S. M. Avdoshenko and A. Strachan, "High-temperature Emissivity of Silica, Zirconia and Samaria from Ab initio Simulations: Role of Defects and Disorder", *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 22, No. 7, 075004 (2014).
15. W. S. Nam, "Characteristics of Flame Spread on Thermally-thin Combustibles exposed to Atmospheric Conditions of a Pressurized Module for Manned Space Flight", Master's Thesis, Chosun University (2019).
16. S. H. Park, S. C. Choi, M. Y. Choi and A. Yozgatligil, "New Observations of Isolated Ethanol Droplet Flames in Microgravity Conditions", *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 180, No. 4, pp. 631-651 (2008).