

분위기유속에 따른 확산화염내 매연거동과악

최재혁⁺·박원석⁺⁺·윤석훈⁺⁺⁺·오 철⁺⁺⁺⁺·김명환⁺⁺⁺⁺⁺

Observation of Soot Behavior in Diffusion Flame according to Surrounding Air Velocity

Jae-Hyuk Choi⁺, Won Seok Park⁺⁺, Seok Hun Yoon⁺⁺⁺,

Cheol Oh⁺⁺⁺⁺ and Myoung Hwan Kim⁺⁺⁺⁺⁺

Abstract : The effect of surrounding air velocity on the soot deposition process from a diffusion flame to a solid wall was investigated in a microgravity environment to attain in-situ observations of the process. An ethylene(C₂H₄) diffusion flame was formed around a cylindrical rod burner in surrounding air velocity of v_{air}=2.5, 5, and 10 cm/s with oxygen concentration of 35 % and wall temperature of 300 K. Laser extinction was adopted to determine the soot volume fraction distribution between the flame and burner wall. The experimental results show that the soot particle distribution region moves closer to the surface of the wall with increasing surrounding air velocity. A numerical simulation was also performed to understand the motion of soot particles in the flame and the characteristics of the soot deposition to the wall. The results successfully predicted the differences in the motion of soot particles by different surrounding air velocity near the burner surface and are in good agreement with observed soot behavior in microgravity. A comparison of the calculations and experimental results led to the conclusion that a consideration of the thermophoretic effect is essential to understand the soot deposition on walls.

Key words : Diffusion flame(확산화염), Surrounding velocity (분위기 유속), thermophoretic effect (열영동 효과)

1. 서론

현재, 지구환경문제와 관련해 자원, 에너지 및 대기오염물질의 측면에서 연소 현상의 과학적 해명은 시급한 문제이다. 그 중에서도 연소 장치에서 생성되는 매연 입자는 주요한 환경오염물질 중 하나이며, 이 매연 입자의 생성 조건 및 부착 거동 등을 해명하는 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다. 매연 입자는 유해 폐기물로서 알려진 반면, 화염 중에서는 복사매체로서 작용해 가열로 등에서는 중요한 역할을 한다. 그러나 지금까지 이러한 매연 입자의 생성기구 및 벽면으로의 매연 입자 부착에 관한 해명은 거의 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 미소중력장을 이용하여 직교류 확산화염을 관찰하여 산소 농도 35 %, 분위기속도가 v_{air} =2.5 cm/s, 5 cm/s, 10 cm/s 일 때의 확산화염 내 매연 입자의 거동 및 매연 입자의 벽면으로의 부착 조건에 대해서 조사하였다. 그리고 수치 해석을 행하여 매연 입자에 작용하는 온도장 및 유동장에 대해서도 상세히 해석을 하여 매연입자의 거동 및 벽면으로의 부착 특성을 살펴보았다.

이다. 사용한 버너는 직경 30 mm, 길이 210 mm의 원통형의 버너를 이용하였다. 원통 버너의 일부에는 소결 금속으로 만들어진 폭 20 mm의 다공질의 연료 분출구가 있으며, 이 분출구로부터 연료(C₂H₄)를 0.8 cm/s의 속도로 분위기 공기 흐름에 수직으로 분출시켰다. 이 원통 버너를 사용함으로써 투과광 영상을 촬영 할 때 화염 가장자리의 영향을 무시할 수 있다. 한편 미소중력실험에는 북해도 카미스나가와(上砂川)의 미소중력실험센터(JAMIC)의 500 m급 낙하탑을 이용하였다.

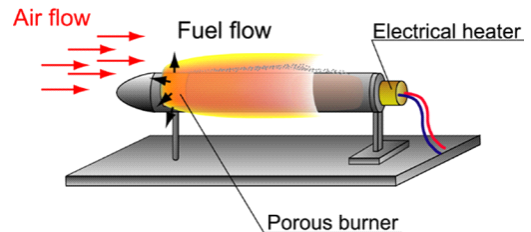


Fig. 1 Schematic diagram of the cylindrical burner

2. 실험 장치 및 방법

실험 장치에 대해서는 저자들의 전 연구^[1]에 상세히 설명되어 있으므로 여기서는 간단히 서술한다. 원통 버너 내부에는 전기 히터를 삽입하여 원통벽면온도를 일정온도(본 연구에서는 300 K)로 유지할 수 있도록 하였으며, 산소 농도 35%(N₂ Balance)의 분위기 가스는 v_{air} = 2.5 cm/s, 5 cm/s, 10 cm/s의 속도로 버너에 평행하게 화염에 공급된다. 현상의 촬영에는 상부에서 직접 촬영을 하였고, 측면에서 레이저 광을 이용하여 투과광 영상을 촬영하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 버너

3. 실험 결과 및 고찰

Fig.2에 분위기 공기 온도 300 K, 벽면 온도 300 K에서의 분위기 공기 유속이 각각 2.5, 5, 10 cm/s 일 때의 화염의 직접 영상과 매연 입자의 분포를 가시화 한 투과광 영상을 나타냈다. 좌측의 사진이 화염의 직접 영상이며, 우측이 투과광 영상이다. 분위기 공기 속도가 증가함에 따라 화염 휘도가 크게 증가하고 화염 길이도 증가하고 있다. 특히, 화염 내 매연 입자의 분포에서는 큰 차이를 보였다. 다음으로, 화염 내 매연 입자 농도 분포를 검토하기 위해서, Fig. 3에 v_{air} =5 cm/s, 10 cm/s

+ 최재혁(한국원자력연구소 원자력수소사업추진반), E-mail: jhchoi@kaeri.re.kr, Tel: 042)868-2066
++ 박원석, 한국원자력연구소
+++ 제3저자이름, 한국해양대학교
++++ 제4저자이름, 한국해양대학교
+++++ 제5저자이름, 한국해양대학교

4. 수치 해석과 열영동 효과

지금까지의 실험결과로부터 화염내 생성되는 매연 입자의 농도분포는 분위기 속도가 증가함에 따라 벽면에 가까워지는 것을 알 수 있었다. 이 원인으로서는 분위기 공기 속도의 변화에 따른 화염내 온도장 및 유동장이 변하기 때문에 매연 입자의 거동이 변화하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 행하여 화염내 매연 입자의 거동 및 벽면으로의 부착 현상에 영향을 미치는 온도장과 유동장을 좀 더 자세히 살펴보았다. 고려한 기본 방정식은 질량, 운동량, 에너지, 화학종 방정식이며, 식중에 사용된 점성계수와 비열 등의 열역학 물성치는 Chemkin을 이용하여 구하였다. 연소모델은 1차 총괄반응이다. 그리고 열영동 속도를 구하기 위해 사용한 식은 아래와 같이 Waldmann^[2]에 의해 제안된 방정식이다.

$$U_r = \frac{3\nu}{4(1 + \frac{\pi}{8}\alpha_m)} \cdot \frac{\nabla T}{T} \quad (1)$$

여기서 ν 는 동점성 계수이다.

Fig. 4는 $v_{air} = 5 \text{ cm/s}$ 일 때의 매연 입자 부착 현상을 나타낸 개념도이다. 그림 내 벡터는 혼합가스 속도 벡터이며, 점선은 열영동 효과를 고려한 경우의 soot line, 실선은 열영동 효과를 무시한 경우의 soot line이다. 이 결과에서 알 수 있듯이 열영동 효과를 무시한 경우 매연이 그대로 하류 쪽으로 흘러가는 것을 알 수 있다. 그에 반해 열영동 효과를 고려한 경우 Fig. 2(b)의 투과광감쇠영상과 거의 일치하는 현상을 보이고 있다. 이것은 벽면근방 확산화염내 매연 입자가 벽면으로 부착하는데 열영동 효과가 중요한 역할을 한다는 것을 의미한다.

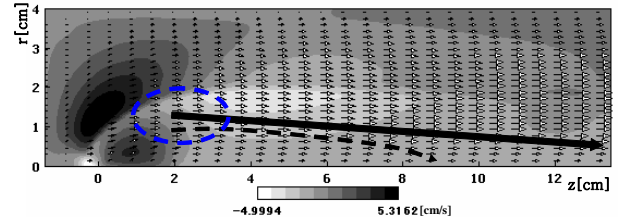


Fig. 4 Soot agglomeration line at $v_{air}=5\text{cm/s}$

5. 결론

분위기 공기 속도가 증가함에 따라 매연입자의 산화가 촉진되어 화염중에 존재하는 매연 입자는 감소하며, 분위기 공기 속도가 5 cm/s 에서 10cm/s 로 증가할 경우 매연 입자의 체류 시간이 감소하여 매연입자는 벽면으로 부착하기 어렵다.

자유분자흐름영역의 예측식인 Waldmann 방정식에 의해 계산한 결과는 실험으로 관찰된 매연 입자의 거동과 좋은 일치를 보였다. 이것은 미소중력하에서의 확산화염 내 매연에 대한 열영동 효과를 조사할 때 자유분자흐름영역의 가정은 타당하다는 것을 나타낸다. 또한 열영동 현상의 고려는 확산화염 내 매연의 부착거동을 결정함에 있어 필수불가결한 요소라는 것을 나타낸다.

참고문헌

- [1] 최재혁, 후지타오사무, 윤석훈, “미소중력환경하에서의 확산화염내 매연입자의 벽면부착 관찰,” 한국마린엔지니어링학회 춘계학술대회 pp. 34-39, 2005.
- [2] L. Waldmann, Academic Press Inc., pp. 323-344, 1961.

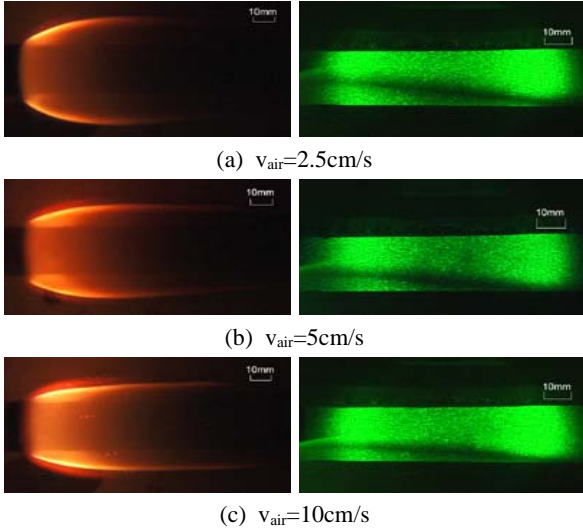


Fig. 2 Direct image and extinction image in $T_{air}=300 \text{ K}$

일 때의 화염 중 매연 입자 체적 분율을 나타낸다. 이것은 상류 쪽 버너 앞 가장자리로부터 각각 $z = 50, 70, 90, 110 \text{ mm}$ 의 4 점에서 산출했다. Fig.3의 결과에서 공통으로 관찰된 것은 상류 쪽 버너 앞 가장자리에서 거리가 멀어짐에 따라, 그 분포 위치는 버너 벽면 방향에 가까워지고 최고 농도는 증가한다는 것이다. 분위기 공기 유속이 증가하면, 화염 면에 공급되는 산소량이 증가해 매연 입자의 생성 속도는 증가하지만, 매연 입자의 산화 속도도 증가한다. 따라서 분위기 공기 유속의 증가와 더불어 생성과 산화의 균형을 이룬 위치에서 극대치를 나타낸다. 또, 분위기 공기 유속이 증가하면 화염 면은 버너 벽면에 가까워지기 때문에 매연 입자 생성 위치도 버너 벽면 방향으로 이동한다. 그 때문에 분위기 공기 유속이 증가하면, 매연 입자는 부착하기 쉬워진다. 그러나, 분위기 가스 유속이 10 cm/s 때, 매연 입자의 생성 위치는, $v_{air}=5 \text{ cm/s}$ 와 비교해 버너 벽면에 가까워지지만, 화염 하류방향으로 이동함에 따라서 벽면에 대한 수직방향의 속도가 작아져 매연 입자의 체류시간이 감소하여 벽면으로의 매연 입자 이동량이 줄어들며, 벽면으로 부착하기도 어렵게 된다.

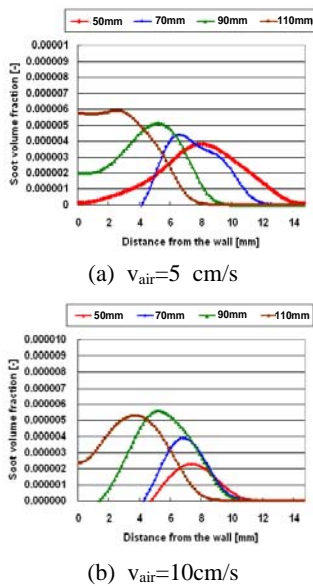


Fig. 3 Soot Volume fraction