

미소중력환경에서의 고체벽면근방 층류확산염내 매연입자의 열영동 부착

최재혁* · 후지타 오사무** · 정석호***

Thermophoretic deposition of soot particles in laminar diffusion flame along a solid wall in microgravity

Jae-Hyuk Choi, Fujita Osamu, Suk-Ho Chung

ABSTRACT

The deposition behavior of soot particles in a diffusion flame along a solid wall was examined experimentally by getting rid of the effect of natural convection utilizing microgravity environment. The microgravity environment was realized by using a drop tower facility. The fuel for the flame was an ethylene (C_2H_4) and the surrounding oxygen concentration 35% with the surrounding air velocity of $V_a=2.5, 5, \text{ and } 10 \text{ cm/s}$. Laser extinction method was adopted to measure the soot volume fraction distribution between the flame and burner wall. The results show that observation of soot deposition in normal flame was difficult from buoyancy and the relative position of flame and solid surface changes with time. The soot particle distribution region moves closer to the surface of the wall as the surrounding air velocity is increased. And the experiments determined the trace of the maximum soot concentration line. It was found that the distance between soot line and flame line is around 5 mm. That is, the soot particle near the flame zone tends to move away from flame zone because of thermophoretic force and to concentrate at a certain narrow area inside of the flame, finally, to adhere the solid wall.

Key Words : Microgravity, Diffusion flame, Soot deposition, Thermophoretic effect

1. 서 론

화염중에 생성되는 매연입자 (Particulate Matter)는 공업적으로는 중요한 복사 매체이며 화로나 보일러에서는 피열체나 전열관으로 열을 효과적으로 전달하기 위한 중요한 역할을 한다. 한편, 완전연소하지 않고 연소실에서 배출될 경우에는 환경오염물질로서 적극적인 억제가 요구된다. 그러나 아직까지 그 생성이나 화염중의 거동에 관해서는 충분히 해명이 되지 않았으며, 연소과학 분야에 남겨진 중요한 과제 중 하나이다.

매연입자와 같은 작은 입자들은 유체의 흐름이나 농도구배 등에 의해서 이동할 뿐만 아니라 온도 구배에 의해서도 이동한다. 특히 화염과 같이 높은 온도 영역이 존재하는 곳에서는 그 영향이 더욱더 크게 작용하는데, 이와 같이 온도구배가 존재하는 영역에서 입자가 저온쪽을 향해 작용하는 힘을 받는 현상을 열영동 (Thermophoresis)이라 한다. 또한 이 때 작용하는 힘을 열영동력 (Thermophoretic force), 입자에 작용하는 힘이 열영동력과 기체의 점성 저항력만 작용할 때의 입자 평균속도를 열영동 속도 (Thermophoretic velocity)라 한다. 이러한 열영동 현상은 온도구배가 존재하는 영역에서 입자들의 움직임에 의해 영향을 많이 받는 시스템 내에서는 실제적으로 매우 중요한 역할을 한다. 열영동 현상에 의해 차가운 벽면상으로의 입자 부착량은 증가하고 중

* 서울대학교 기계항공 차세대창의설계사업단

† 연락저자, ihhair@snu.ac.kr

** 서울대학교 기계항공공학부

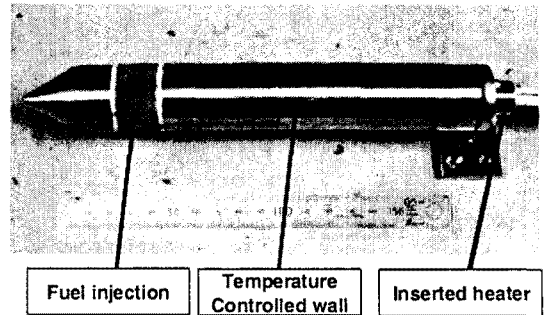
*** 일본북해도대학기계우주공학부

가된 입자로 인해 시스템의 열전달 효율은 감소한다[1]. 또한 큰 온도구배가 존재하는 화염면 부근에서는 열영동 효과가 큰 영향을 미친다[2]. Gomez et al.[3]과 Sung et al.[4]는 확산화염과 비확산화염에서 매연에 대한 열영동 효과의 중요성을 증명하였다. Dobashi et al.[5],[6] 등은 미소중력환경 (Microgravity environment)을 이용한 실험을 통해 온도가 다른 상하 2 장의 판 사이에 형성되는 온도 구배 영역에서 미립자를 분산시켜 상하 벽면으로 이동하는 입자의 거동을 관찰하였다. 이 때 판 사이 온도 구배의 크기에 따라 입자들의 이동 거리는 비례한다는 것을 실험으로 증명하였다. 그러나 대부분의 연구들에서 대상으로 한 매연입자는 화염에서 샘플링한 것이며 화염에서 생성된 매연이 벽면으로 부착해 가는 과정을 동시 관찰한 것이 아니라 결과적으로 생긴 매연 부착량과 유동장 및 온도장과의 상관 관계를 조사한 것이다. 이와 달리 본 연구에서는 매연이 고체벽면으로 부착해 가는 과정을 원위치에서 동시관찰(In-situ observation) 하여 매연입자에 작용하는 열영동효과에 대해서 알아보았다.

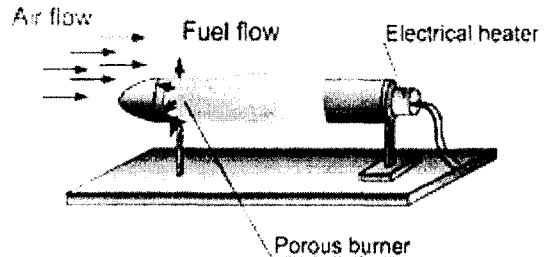
이미 본 저자들에 의해 고체벽면온도[7], 주위 산소농도[8] 및 주위가스온도[9]의 변화에 따라 벽면 근방 확산화염내 매연입자의 부착거동에 어떠한 영향을 미치는가에 대해서 살펴보았다. 따라서 본 연구에서는 앞선 연구들의 일환으로 고온가스연소를 할 때 매연입자의 거동 및 벽면으로의 부착을 제어한다는 관점에서 반드시 고려해야 할 주위 공기 속도의 영향에 대해서 검토한다. 안정된 화염의 형성을 위해서 미소중력환경을 이용하였으며, 형성된 화염으로부터 벽면으로의 매연 부착현상을 레이저 투과법에 의해 관찰하였다. 이와 같은 연구는 처음 시도한 것으로 실제 보일러 및 노(furnace)에서의 부착 현상을 평가하는데 있어 귀중한 데이터를 제공할 것이다.

2. 실험장치 및 방법

실험 장치에 대한 상세한 설명은 앞선 연구 [7],[8],[9]에서 서술하였으므로, 본 연구에서는 실험에 사용된 버너를 위주로 간단히 실험 장치에 대해서 설명한다. 본 연구에서는 고체벽면 근방에서의 안정된 확산화염을 형성하기 위해 그림 1(a)와 같이 직경 30mm, 길이 210mm의 원통형 버너를 이용하였다. 버너는 연료분출을 위해 소결금속으로 만들어진 20mm의 연료 분출구(Fuel injection), 매연 입자의 부착 여부를 알아보기 위한 버너 벽면(Temperature controlled wall, 본 연구에서는 300K로 실험) 및 버너 벽면의 온도를 조절하기 위해 삽입된 축열식 온도조절기



(a) Direct picture of the burner



(b) Conceptual description of the burner

Fig. 1 Schematic Diagram of the cylindrical burner

(Inserted heater)의 크게 세 부분으로 나누어진 다. 그리고 그림 1(b)에서 알 수 있듯이 원주형 버너와 평행하게 공기가 흘러가고, 연료분출구에서 나온 연료에 착화를 하면 화염이 그림에서 보는 바와 같이 버너를 감싸듯이 형성된다. 본 연구에서 주위 공기 속도는 $V_{air} = 2.5, 5, 10\text{cm/s}$ 이며, 연료 분출부에서 연료(C_2H_4)는 $U_f = 0.8\text{cm/s}$ 로 분출된다. 버너 모양을 원주 형태로 한 것은, 본 연구가 이루어지기 전에 실시된 예비실험에서 평판상에 형성되는 경계층형 확산화염을 이용하였을 때 투과광 영상을 촬영할 때 화염의 좌우 끝단에서 생성되는 매연의 영향이 커, 2차원적인 매연의 농도분포를 획득하기가 어려웠기 때문이다. 한편, 이 원주형 버너를 사용함으로써 화염 양단의 영향을 없애고 화염이 안정적으로 축대칭을 이루면 투과광 감쇠상으로부터 아벨 축대칭 변환을 하여 화염내 생성되는 매연입자의 2차원적인 분포를 얻을 수 있다. 현상의 촬영에는 버너의 상부로부터 디지털 비디오 카메라를 이용하여 직접영상을 촬영하였으며, 측면에서는 반도체 레이저(파장 532+/-5 nm, 최대출력 150mW)를 이용하여 투과광 영상을 취득했다.

미소중력 실험에는 일본 홋카이도의 (주)무중력실험센터(JAMIC)의 500m급 낙하탑을 이용하

였다. 이 낙하탑을 이용함으로써 10 sec동안의 미소중력($10^{-5} G_0$ 이하, G_0 는 지상에서의 중력가속도)을 얻을 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 실험결과

앞서 말한 바와 같이 본 연구는 주위 공기 속도에 따른 벽면근방 확산화염내 매연입자의 고체 벽면으로의 부착 거동에 대해서 조사하였다. 실험조건은 벽면온도 300K, 연료분출속도 0.8cm/s이다.

Fig. 2는 중력의 영향에 따른 화염의 직접 영상을 나타낸다. Fig. 2(a)는 통상중력($1G_0$)에서의 직접영상이고, Fig. 2(b)는 미소중력환경에서의 직접영상이다. 그림에서 화살표는 중력의 방향을 나타낸다. 통상중력에서의 영상은 관찰을 시작한 시점으로부터 2.33 sec 후의 결과이며, 미소중력 환경에서의 영상은 낙하개시시간을 $t = 0.0\text{sec}$ 으로 했을 시, 5 sec후의 결과이다. Fig. 2(a)의 통상중력환경에서는 원통 버너 주위의 화염은 부력의 영향으로 상당히 불규칙하며 불안정한 형상을 하고 있는 반면, Fig. 2(b)의 미소 중력 환경에서의 화염은 버너 표면에서 일정거리 떨어진 위치에서 안정된 직교류 확산화염을 형성하고 있다. Fig. 2(a)에서 나타난 화염의 흔들림과 같은 불안정성이 전혀 보이지 않는다는 것을 알 수 있다.

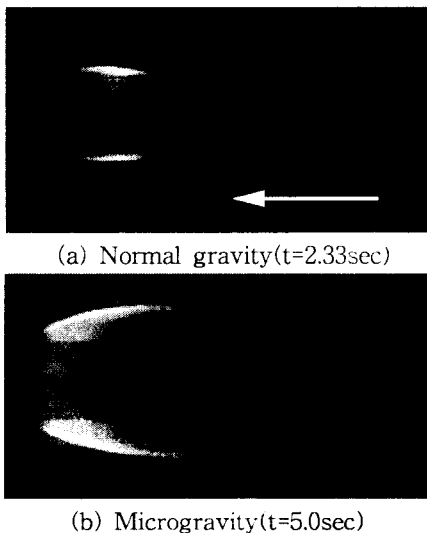


Fig.2 Laminar diffusion flames in normal gravity and microgravity
(Fuel C_2H_4 , N_2 balance, $U_f=0.8\text{cm/s}$, $V_{air}=5\text{cm/s}$, $O_2=35\%$, $T_w=300\text{K}$)

Fig. 2(b)와 같은 화염의 안정된 상황은 화염내의 매연입자의 거동 및 고체 벽면으로의 부착 현상을 원위치 관찰(In-situ observation) 하는데 매우 바람직한 조건이다. 또한 이 결과로부터 벽면근방 확산화염내 매연입자의 분포 및 부착 현상을 파악하는데 있어 미소중력환경의 이용은 매우 바람직하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3에 화염의 직접 영상과 매연 입자의 분포를 가시화한 투과광 영상을 나타냈다. 왼쪽의 직접 영상의 결과로부터 주위 공기 속도가 증가함에 따라 화염 휘도(flame luminosity)가 증가하고 화염 길이(flame length)도 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 일반적으로 화염면에는 주위로부터 산화제가 공급된다. 이 때 산소 농도 및 주위 가스 온도가 같은 경우 화염면에 공급되는 단위시간당 산소의 양은 주위 공기 속도에 의해 정해진다. 또, 화염 반응대에 공급되는 산화제가 증가하면 화염면에서의 반응속도가 증가하기 때문에 발열량이 커져 화염휘도가 증가한다. 특히 투과광 영상에서 알 수 있듯이 화염 내 매연 입자의 분포에서는 큰 차이를 보였다. 주위 공기 속도가 증가함에 따라 매연 입자는 벽면에 가깝게 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 주위 공기 속도가 빨라짐에 따라, 분출되는 연료의 분포가 벽면근방에 더 가까이 위치하기 때문이다. $V_{air}=2.5\text{cm/s}$ 일 때 버너 연료 출구부에서 가장 먼 위치에 매연 입자가 흘러가고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞서 설명한 바와 같이 통상중력환경에서는 불가능하며, 본 연구에서 처음으로 미소중력환경을

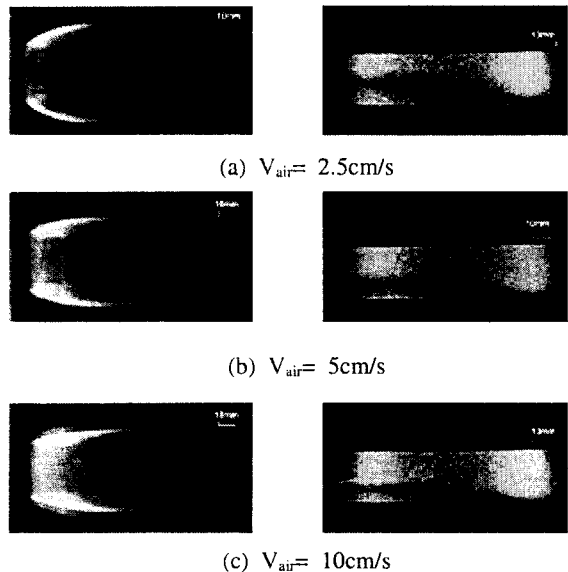


Fig. 3 Direct image and extinction image in $T_{air}=300\text{K}$
($O_2=35\%$ N_2 balance, $U_f=0.8\text{cm/s}$, $T_w=300\text{K}$)

이용한 벽면근방 화염내 매연입자의 원위치 관찰이 이루어졌다.

Fig. 4는 화염면의 위치와 매연입자의 응집영역을 정량적으로 판단하기 위한 두 개의 위치 관계를 나타낸다. 화염의 외측경계에서 정의한 화염면의 위치는 "flame line"으로 표시되어 있고 감쇠율이 가장 높은 위치를 "soot line"으로 표기했다. Fig. 4에서 주위 공기 속도의 증가에 화염면의 위치와 매연입자의 분포는 각각 벽면에 가까워지고 있는 것을 확실히 알 수 있다. flame line의 길이 역시 증가함을 알 수 있다. 여기서 흥미로운 점은 매연 입자의 투과광 감쇠율이 가장 큰 위치는 주위 공기 속도의 증가함에 따라 그 분포위치는 크게 달라진다는 점이다. 또한 점선의 원이 그려져 있는 soot line의 후방 부분에 주목하면 $V_{air}=2.5\text{cm/s}$, 10 cm/s 일 때 $V_{air}=5\text{cm/s}$ 보다 더 멀리까지 매연입자가 흘러가는 것을 알 수 있다. 즉, 주위 공기 속도가 증가할수록 화염면의 위치는 벽면에 가까워지나, 매연입자의 분포는 그에 비례하지 않는다는 것을 알 수 있다.

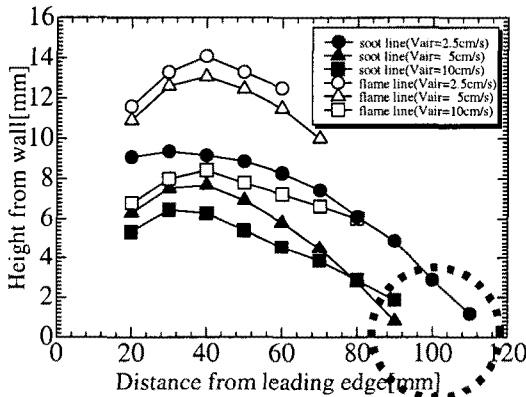


Fig. 4 Maximum soot concentration position(soot line and visible flame position (flame line) along the flow direction for different surrounding air velocities

Fig. 5는 매연 입자의 농도분포를 정량적으로 판단하기 위해 각 주위 공기 속도에 따른 화염 선단 가장자리(다공질 분출부의 상류 측단이 원점)로부터의 거리가 각각 50, 70, 90, 110mm의 위치에서 구한 매연의 체적 분율을 나타낸다. 이것은 Fig. 3의 투과광 영상을 아벨 측대칭 변환에 의해 구한 값이다. 그림으로부터 매연의 체적 분율은 특정의 반경 방향위치에서 극대치를 나타내고 있으며 그 극대치를 나타내는 위치는 모든 주위 공기 속도 조건에서 화염 선단 가장자리에 멀어질수록 매연의 체적분율 값이 커진다는 것을 알 수 있다. 이것은 화염내 매연이 어느 일정 지점을 향해 나아가면서 형성된다는 것을 의미한다. 여기서 주목할 점은 주위 공기 속도에 따라

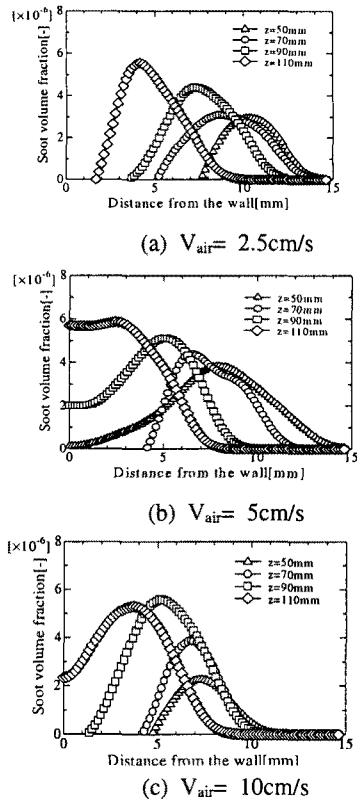


Fig. 5 Soot volume fraction with different surrounding air velocity

그 극대치 값은 크게 차이가 없으나 그 위치는 차이가 있다는 점이다. 예를 들면, $V_{air}=2.5\text{cm/s}$ 에서는 110mm지점에서 벽면으로부터 4mm 떨어진 지점에서 고농도를 나타내고, $V_{air}=5\text{cm/s}$ 에서는 110mm지점에서 거의 벽면에 부착한 상태이며, $V_{air}=10\text{cm/s}$ 경우 근소한 차이지만 90mm 지점에서는 극대치를 나타내며 그 위치는 벽면에서 약 5mm 떨어진 곳이다. 이와 같이 극대값의 위치가 주위 공기 속도에 따라 크게 변화하는 이유는 Fig.4에서도 언급한 바와 같이 매연 입자의 분포의 폭이 주위 공기 속도의 변화에 따라 좁은 특정 범위에서 다르게 집중하는 경향이 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 주위 공기 속도에 따른 화염 선단 가장자리(다공질 분출부의 상류 측단이 원점)로부터의 거리가 각각 50, 70, 90, 110mm의 위치에서의 최대 매연 체적 분율을 나타낸다. 전체적으로 최대 체적 분율값은 $V_{air}=5\text{cm/s}$ 일 때 5.87×10^{-6} 이다. 그리고 $V_{air}=5\text{cm/s}$ 일 때 각 위치에서 높은 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 화염내 매연의 분포 및 부착위치는 주위 공기 속도에 비례하지 않으며, 적절한 주위

공기 속도를 적용할 필요가 있다는 것을 알 수 있다.

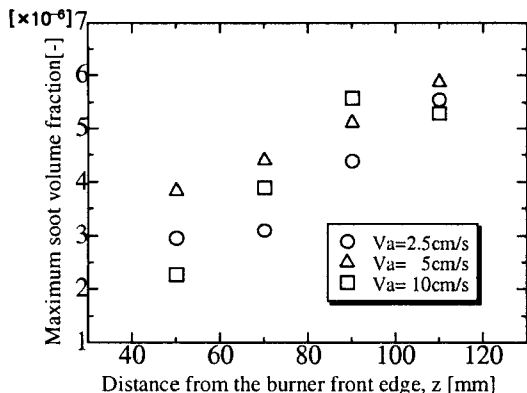
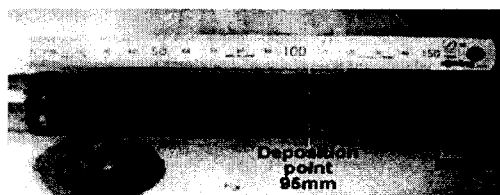
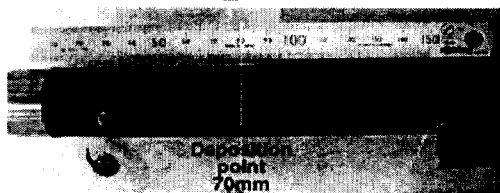


Fig. 7 Maximum soot volume fraction with different surrounding air velocity

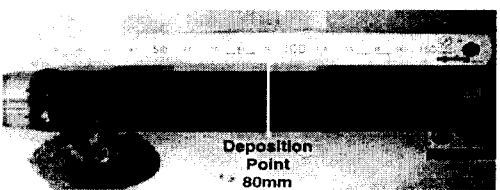
Fig. 8은 주위 공기 속도가 2.5cm/s, 5cm/s, 10cm/s 일 때의 실험 후의 버너 표면을 사진 촬영한 것이다. 연료분출구 직후의 위치에서는 통상중력환경에서 착화를 하면 어떤 경우에도 매연이 부착한다. 그림에서 나타낸 바와 같이 $V_{air}=2.5$ cm/s에서는 95mm, $V_{air}=5$ cm/s에서는 70mm, $V_{air}=10$ cm/s에서는 80 mm전후에 부착하는 것을 알 수 있다. 즉 주위 공기 속도의 증



(a) $V_{air}=2.5$ cm/s



(b) $V_{air}=5$ cm/s



(c) $V_{air}=10$ cm/s

Fig. 8 soot trace on the burner wall after experiment

가와 함께 그 부착 위치는 연료 분출구쪽에 가까워지나 $V_{air}=10$ cm/s 에서는 오히려 멀어지는 것을 알 수 있다. Fig. 8의 결과로부터 지금까지의 관찰한 실험 결과를 증명할 수가 있다.

Fig. 9에 매연 입자에 작용하는 화염중의 힘들과 열영동 효과에 의해 어떤 현상이 일어나는지에 대해 나타냈다. 화염내 생성된 많은 1차 입자경의 매연 입자들은 체적팽창에 의한 가스 대류속도와 온도구배에 의해 작용하는 열영동 효과에 의해 버너 벽면으로 향하게 된다. 여기서 화염면 근방에서는 반응대의 높은 온도에 의한 체적팽창력(Flow force)이 크게 작용을 하게 되지만, 그 영향력이 줄어드는 벽면 근방에서는 거의 대부분이 열영동 효과에 의해 매연 입자가 움직이게 된다. 그 결과 확산화염내 생성되는 매연 입자는 열영동 속도와 가스 대류 속도가 평형을 이루는 위치에 자리하게 된다. 즉, 주위 공기 속도가 빠를수록 벽면 근방에서의 가스 대류 속도도 비례해서 커지게 된다. 따라서 $V_{air}=10$ cm/s일 때, 화염면을 지나면서 오버슈트 된 상대적으로 빠른 가스 대류 속도와 벽면 근방에서의 상대적으로 빠른 측방향 속도로 인해 $V_{air}=5$ cm/s보다 먼 위치에 부착하게 된다. 이러한 결과들은 Fig. 2에서 말한 바와 같이 벽면근방 확산화염의 경우 통상중력환경에서는 그 관찰이 어렵다.

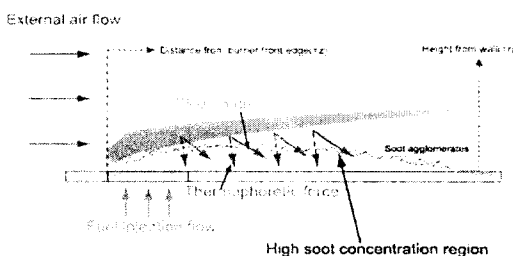


Fig. 9 Physical model of soot particle motion under the effect of flow force and thermophoretic

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 주위 공기 속도에 따른 벽면 근방 확산화염내 매연 입자의 부착 거동을 미소중력실험을 통해 원위치 관찰로 조사하였다. 화염내 온도장 및 유동장의 변화를 가져오는 주위 공기 속도는 매연 입자의 고체 벽면으로의 부착 특성도 변화 시켰다. 먼저, 통상중력환경에서는 부력으로 인한 화염의 불안정성으로 인해 벽면근방 확산화염에서의 부착거동의 원위치 관찰은 불가능하다는 것을 알 수 있었다. 또한 주위 공기 속도가 증가할수록 화염면 및 화염내 매연 분포 영

역은 고체벽면에 가까워진다는 것을 알 수 있었다. 그러나 매연 입자의 부착 위치는 $V_{air}=2.5\text{cm/s}$ 에서 가장 먼 곳에 위치했으며, $V_{air}=10\text{cm/s}$ 일 때는 화염내에서의 큰 가스 대류 속도로 인한 매연입자의 짧은 체류시간과 벽면 근방에서의 작은 열영동 효과로 인해 $V_{air}=5\text{cm/s}$ 보다 더 멀리 위치했다. 즉, 적정 화염 내 매연입자의 최대체적분율은 $V_{air}=5\text{cm/s}$ 에서 5.87×10^{-6} 이었다. 이와 같이 미소중력환경의 특징을 이용한 실험을 통해 벽면 근방 확산화염내 매연입자의 거동 및 부착 특성을 파악함으로써 열영동 효과의 중요성에 대해서 알 수 있었다. 그러나 주위 공기 속도에 따른 열영동 효과에 대해 보다 자세한 결과를 얻기 위해서는 수치해석을 통해 그 유동 현상을 파악할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2007년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- [1]N. Motassier., D. Boulaud., A. Renouz., "Experimental Study of Thermophoretic Particle Deposition in Laminar Tube Flow," *J. Aerosol Sci.* 22, 1991, pp. 677-687.
- [2]Dobashi, R., Kong, Z. W., Toda, A., Takahashi, N., Suzuki, M., and Hirano, T., "Mechanism of Smoke Generation in a Flickering Pool Fire", *Proc. of 6th Fire Safety Science*, 1999, pp. 255-264.
- [3]A. Gomez, and D.E Rosner, "Thermophoretic effects on particles in counterflow laminar diffusion flames," *combustion Science and Technology*, 89, 1993, pp. 335-362.
- [4]C. J. Sung, C. K Law, R. L.Axelbaum, *Combust. Sci. Technol.*99, 1994, pp. 119-132.
- [5]Toda,A., Ohi,Y., Dobashi,R., Hirano,T., and Sakuraya,T. ,Accurate Measurement of Thermophoretic Effect in Microgravity, *J. Chem. Phys.* 105(16), 1996, pp. 7083-7087.
- [6]Ono, H., Dobashi,R., Sakuraya ,T., Thermophoretic Velocity Measurement of soot Particles under a Microgravity condition, *Proc. Combustion Institute Vol.29* (2002), p.2375-2382
- [7]Fujita. O., Choi. J. H., Tsuiki. T., A Study on the Effect of Wall Temperature on Soot Deposition Process form a Diffusion flame in Microgravity," *JSME(B)*,703,2005, pp. 226-233.
- [8]Choi. J. H., Fujita.O., Tsuiki. T., Kim. J. and Chung. S. H., "A Study of the Effect of Oxygen Concentration on the Soot Deposition Process in a Diffusion Flame along a Solid Wall by In-Situ Observation in Microgravity", *JSME(B) International Journal*, Vol. 48, No.4 (2005), pp. 839-848.
- [9]Choi. J. H., Fujita.O., Tsuiki. T., Kim. J. and Chung. S. H., "In-situ Observation of the Soot Deposition Process on a Solid Wall with a Diffusion Flame along the Wall", *JSME(B) International Journal*, Vol. 49, No.1 (2006), pp. 167-175.