

# 미소중력환경하에서의 확산화염내 매연입자의 벽면부착 관찰

최재혁<sup>+</sup>·후지타 오사무<sup>++</sup>·윤석훈<sup>+++</sup>

## Soot Deposition Process in a Diffusion Flame to the Wall under Microgravity

Jae-Hyuk Choi<sup>+</sup>, Osamu Fujita<sup>++</sup> and Suck Hun Yoon<sup>+++</sup>

**Abstract** : Experiments at the Japan Microgravity Center(JAMIC) have investigated the interaction between diffusion flames and solid surfaces placed near flames. The fuel for the flames was  $C_2H_4$ . The surrounding oxygen concentration was 35% with temperatures of  $T_a=300$ . Especially, the effect of wall temperature on soot deposition from a diffusion flame placed near the wall has been studied by utilizing microgravity environment, which can attain very stable flame along the wall. Cylindrical burner with fuel injection was adopted to obtain two dimensional soot distributions by laser extinction method. In the experiment two different wall temperatures,  $T_w=300,800K$ , were selected as test conditions. The results showed that the soot distribution between flame and burner wall was strongly affected by the wall temperature and soot deposition increases with decrease in wall temperature. The comparison among the values for two different wall temperatures suggested that the change in thermophoretic effect is the most dominant factor to give the change in soot deposition characteristics.

**Key words** : Microgravity(미소중력), Diffusion flame(확산화염), Soot deposition(매연부착), Thermophoretic effect(열영동 효과)

### 기호설명

$U_f$  : Fuel velocity, cm/s

$V_a$  : Air velocity, cm/s

$T_w$  : Wall temperature, K

$T_a$  : Air temperture, K

$O_2$  : Oxygen concentration, %

### 1. 서 론

연소장치로부터 배출되는 매연입자는 유해배기성분으로 알려져 있는 한편, 화염중에서는 복사매체로서 작용해 보일러등의 가열로에 있어서는 중요한 역할을 한다<sup>[1],[2]</sup>. 특히, 보일러 및 스팀리포머와 같이 노내에 전열관이 배치되어 있는 경우에는 노의 작동시등에

매연입자가 전열관이나 노벽에 부착해 전열효과를 현저하게 악화시킬 가능성이 있다.

고체벽면으로의 매연입자의 부착현상에 관해서는, 지금까지 몇몇의 연구자에 의해 연구되고 있지만, 초기 단계에서는 보일러등의 노내 운전조건과 전열관의 온도조건등에 대한 부착량의 차이를 구하는 실험적인 연구<sup>[3]</sup>가 대부분이었다. 그 후, 매연을 연소장에서 샘플링하는 상황을 상정해 화염내의 금속봉등을 삽입했을 때의 부착량을 구하는 연구가 행하여졌으며, 금속봉의 온도 및 유동장과의 상관 관계등이 부착현상에 미치는 영향이 연구되어지고 있다<sup>[4],[5]</sup>. 그러나 이 연구들은 화염에서 생성된 매연이 벽면으로 부착해 가는 과정을 동시 관찰한 것이 아니라, 결과적으로 생긴 매연 부착량과 유동장 및 온도장과의 관련을 조사한 것이다. 온도 구배장이 매연입자에 작용하는 영향을

+ 최재혁(한국원자력연구소 원자력수소 사업추진반), E-mail: jhchoi@kaeri.re.kr, Tel: 042)868-2066

++ 후지타 오사무, 일본 북해도대학 기계우주전공분야

+++ 윤석훈, 한국해양대학교 기관시스템공학부

가장 직접적으로 관찰한 연구로서는, Dobashi<sup>[6]</sup>에 의해 연구된 연구가 있다. 이 연구에서는 온도 구배장에서 피할 수 없는 자연대류의 효과를 미소중력환경을 이용하는 것으로 무용화 시키고, 온도가 다른 상하 2장의 판 사이에 형성되는 온도 구배장에 화염에서 채취한 매연입자들의 미립자를 분산 시켜 그 거동을 관찰한 것이다. 그러나, 이 연구에서 대상으로 한 매연입자는 화염에서 샘플링한 것이며, 화염에서 생성되는 매연입자의 부착 과정을 동시관찰 한 것이 아니다.

본 연구에서는 일정하게 흐르는 분위기 가스중에 놓여진 버너의 벽면에서 연료를 분출하고, 벽면에 병행한 확산화염을 형성해, 이 화염을 미소중력장에 두는 것으로 벽면에 대해 위치가 안정된 화염을 형성시켜 그 화염으로부터 벽면으로의 매연 부착현상을 레이저 투과법에 의해 관찰했다. 특히, 화염에서 벽면으로의 부착거동에 관해서는 분위기 온도, 분위기 산소농도등 여러 가지 파라메타가 영향을 줄 것으로 생각되어지나, 본 연구에서는 이 중 부착 형상에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 생각되어지는 벽면온도의 영향에 대해 관찰한 결과를 보고한다. 그리고 본 연구의 고찰 부분에서는 화염중의 매연 입자의 부착특성에 영향을 미치는 주요 힘들에 대하여 간략히 설명했으며, 벽면 근방의 안정된 화염생성을 위해서 일본 무중력 실험센터(JAMIC)의 미소중력 환경을 이용해 실험을 행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 고체벽면에 병행한 안정된 확산화염을 형성하기 위해서 Fig. 1과 같이 직경30mm, 길이 210mm의 원통형의 버너를 이용했다. 원통 버너의 일부에는, 소결 금속으로 만들어진 폭 20 mm의 다공질의 연료 분출구가 있으며, 이 분출구로부터 연료( $C_2H_4$ )가 0.8cm/s로 분위기 가스 흐름에 대해 수직으로 분출된다. 이 원통 버너를 이용함으로써 투과광 감쇠상 촬영시의 화염 양단의 영향을 무시 할 수 있다. 본 실험의 중요 파라메타인 벽면 온도(300, 800K)를 조절하기 위해서 원통 버너 내부에 카트리지 전기 히터를 삽입해, 벽면 온도를 변화 시켜 실험을 했다.

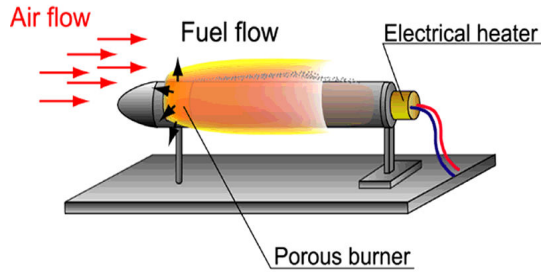


Fig. 1 Schematic diagram of the cylindrical burner

Fig. 2는 본 연구의 실험장치를 나타낸다. 시험부는, 내부치수 130(W)×255(D)×85(H) mm의 단열된 알루미늄체의 덕트이다. 한편, 산소 농도35%(N<sub>2</sub> Balance)의 분위기 가스는, 축열식 예열 장치로 적당한 온도(본 실험에서는 상온)로 예열된 후 버너에 평행하게 일정속도(5cm/s)로 화염에 공급된다. 현상의 촬영에는, 상부로부터 디지털 비디오 카메라를 이용해 직접영상을 촬영했으며, 측면에서는 반도체 레이저(파장 532+/-5nm, 최대출력 150mW)를 이용해 투과광 영상을 취득했다. 화염이 안정된 축대칭 구조를 가지고 있으면, 투과광 감쇠상으로부터 아벨 축대칭 변환을 해 화염중에 생성되는 매연입자의 2차원적인 분포를 구할 수 있다. 미소 중력 실험에는, 일본 훗카이도의 (주) 일본 무중력 실험 센터(JAMIC)의 500 m급 낙하탑을 이용했다.

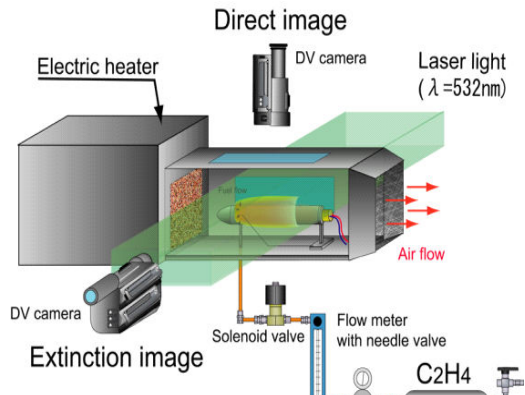


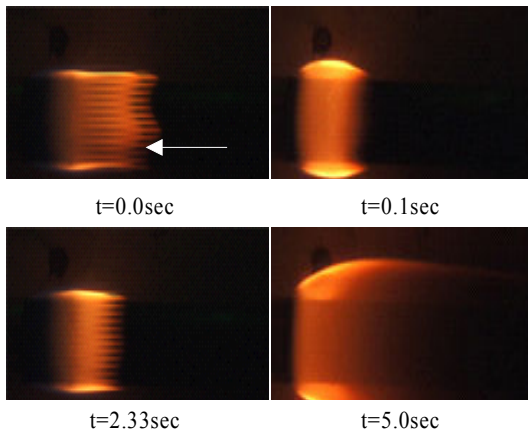
Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 실험결과

먼저, 화염거동에 대한 중력의 영향에 대해서 설명한다. Fig. 3은 통상중력환경(a)과 미소중력환경(b)에서의 벽면근방 확산화염의 시계열 변화를 나타낸다. 실험 조건으로, 연료는 에틸렌( $C_2H_4$ ), 연료 분출 속도는  $U_f=0.8\text{cm/s}$ , 분위기 산소농도는 35%, 분위기 가스 속도  $V_a=5\text{cm/s}$ , 분위기 밸런스 가스는 질소이다. 분위기 가스온도와 벽면온도는 300K이다. 그림에서 화살표는 중력의 방향을 나타내며, 분위기 가스는 그림의 좌측에서 우측으로 흘러가고 있다.

Fig. 3(a)의 통상중력장에서 원통 버너 주위의 화염은 부력의 영향으로 인해 주기적으로 진동하고 있으며, 화염과 고체 벽면의 상대적인 위치 및 화염의 길이가 시간과 함께 변화하고 있다. 이때, 급격한 화염 형상의 변화와 더불어 화염이 후방쪽에서 떨어져 나가는 것을 관찰 할 수 있다. 이와 같이 진동하는 화염에서 매연 입자의 분포 및 벽면으로의 부착에 대해 고찰할 때, 시계열 변화를 고려할 필요가 있으므로, 그 해석이 곤란하다. 더욱이, 자연대류의 영향으로 인해 물리적 현상을 정확히 파악하기는 더욱 어렵다. 그에 반해, Fig.3(b)의 미소중력장에서의 화염은 버너 표면에서 떨어진 위치에서 안정된 직교류 확산화염을 형



(a) Normal gravity (b) Microgravity

Fig. 3 A laminar diffusion flame near a solid wall in normal gravity(a) and microgravity(b)

성하고 있다. 통상중력장에서 보여진 화염 진동은 전혀 일어나지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 상황은 화염내의 매연입자의 거동 및 벽면으로의 부착을 관찰하는데 매우 바람직한 현상이다. Fig. 3의 결과로부터 미소중력환경의 이용은 매연의 분포 및 부착특성을 검토함에 있어 많은 유리한 점을 가지고 있으며, 필수적인 요소라는 것을 확실히 알 수 있다.

Fig. 4는 분위기 가스 온도  $T_a=300\text{K}$ , 벽면 온도  $T_w=300\text{K}$ , 800K때의 미소 중력환경에서 취득한 영상을 나타낸다. 주된 실험 조건은, 공기유속 5 cm/s, 연료 분출 속도 0.8cm/s (주류 속도의 0.16배), 공기중의 산소 농도는 35%이다. 미소 중력장에서는, 화염중에서의 산소 공급량이 적게 되어, 저유속조건에서는 화염 온도가 저하해 매연의 생성량이 적게 되므로, 관찰을 용이하게 하기 위해서 고산소 농도에서 실험을 하였다. 또, 사진에서 좌측은 화염의 직접 영상이며, 우측은 투과광 영상이지만, 우측의 투과광 영상은 광학계의 시야 관계로 버너의 상반분의 화염을 촬영하고 있다. 각 투과광 영상에서, 아래쪽의 검은 부분은 원통 버너의 그림자이고, 위쪽은 덕트에 장착된 창 의 상단 범위까지가 보이고 있다. Fig. 4에서 각각의 벽면 온도에 따른 화염 형상을 비교해 보면, 벽면 온도가 증가할수록 화염 위치가 약간 외측으로 이동하고 있는 것처럼 보이지만, 화염 휘도 또는 화염 길이 등, 육안으로 관찰되는 범위에서는 그 차이가 지극히 작다. 한편, 투과광 영상으로부터 판단되는 화염중의 매연 농도분포에는, 벽면 온도의 상승에 따른 영향을 현저하게 볼 수 있다. 그림에서 검은 그림자처럼 보이는 부분이 화염중에서 매연농도가 특히 높은 부분으로 생각되며, 그 부분이 벽면 온도의 증가와 더불어 서서히 벽면으로부터 떨어져 가는 것을 알 수 있다. 예를 들면,  $T_w=300\text{K}$ 때에는 매연입자의 그림자가 벽면에 접촉하고 있는 것에 반해,  $T_w=800\text{K}$ 때에는 버너의 후방에서도 매연입자는 버너 표면에 도달하지 않고 그대로 하류쪽으로 흘러가고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 직접영상과 투과광 영상을 보다 상세하게 비교해, 벽면온도에 대한 화염면 위치(화염의 외측경계에서 정의한 "flame line" 으로 표시되어 있다) 와 감쇠율이 가장 높은 위치("soot line" 이라 표

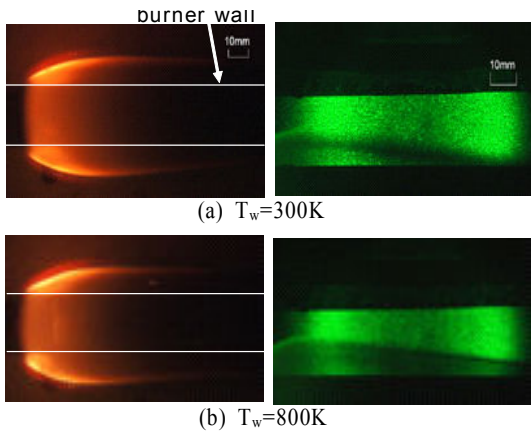


Fig. 4 Direct image and extinction image with different wall temperatures

기되어 있다)의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 4에서 나타내어진 바와 같이 화염면위치는 벽면온도의 상승에 따라 약간 벽면으로부터 멀어지는 경향을 보이는 하나, 투과광영상에서는 그림에서 알 수 있듯이 화염면 위치의 변화는 작다. 한편, 매연입자에 의한 투과광 감쇠율이 가장 큰 위치는 벽면온도의 증가와 함께 그 위치가 크게 변화하며, 매연입자의 분포가 벽면으로부터 크게 멀어지는 경향을 나타낸다. 이와같이, 벽면온도가 변화하면, 화염의 위치는 그다지 변화하지 않으나, 매연농도의 분포가 크게 변화하는 흥미로운 거동이 관찰 되었다.

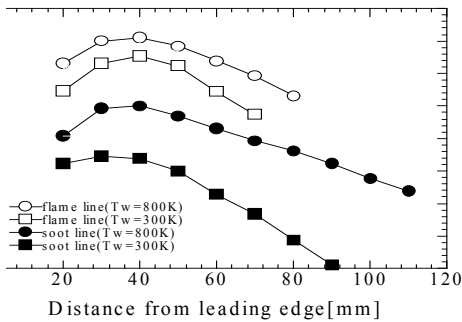
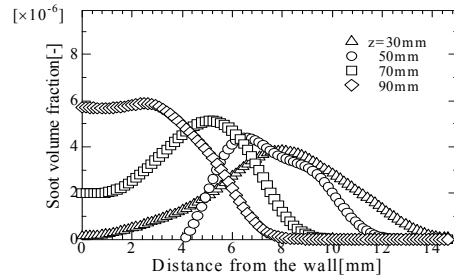
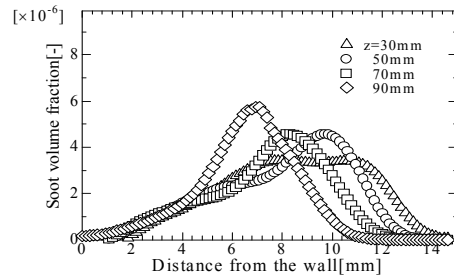


Fig. 5 Comparison of flame line and soot line with different wall temperatures  
( $N_2$  balance,  $U_f=8\text{mm/s}$ ,  $U_a=5\text{cm/s}$ ,  $O_2=35\%$ ,  $T_a=300\text{K}$ )

Fig. 6은, 화염 선단 가장자리(다공질 분출부의 상류측단이 원점)로부터의 거리가 30, 50, 70, 90 mm의 위치에서의 벽면 온도에 따른 매연 체적 분율의 반경방향 분포를 나타낸 것이다. 이 분포를 구할 때에는, 화염이 완전한 동심원상의 구조를 가지고 있다고 가정하고, 투과광으로부터 얻은 이차원 화상으로부터 아벨축대칭 변환을 행하여 반경 방향 감쇠율 분포를 구한 후, 레이리 산란 이론(매연의 일차 입자경을 상정해, 입경 파라미터  $\pi D/\lambda \ll 1$ 을 가정, D:매연의 입경,  $\lambda$ :레이저 광파장, 입자는 구형으로 가정)에 의해 주어지는 감쇠 계수를, Bouguer-Lambert-Beer의 법칙을 도입해 매연 체적분율 분포를 산출한 결과이다. Fig. 6의 결과로부터, 매연 입자의 체적분율은 특정의 반경 방향 위치에서 극대값을 나타내고 있으며 그 극대값을 나타내는 위치는, 어떤 온도 조건에서도, 하류방향으로 진행됨에 따라 벽면측(횡축의 0의 방향)으로 이동하고 있는 것을 알 수 있다. 여기서, 주목해야 할 점은, 어떤 벽면 온도에 있어서도 화염 선



(a)  $T_w=300\text{K}$

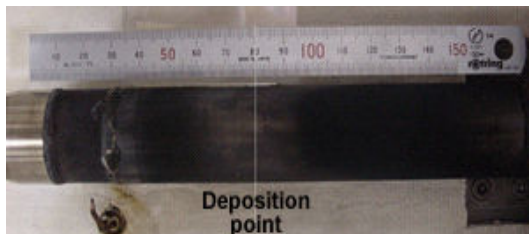


(b)  $T_w=800\text{K}$

Fig. 6 Comparison of soot volume fractions with different wall temperatures  
( $N_2$  balance,  $U_f=8\text{mm/s}$ ,  $U_a=5\text{cm/s}$ ,  $O_2=35\%$ ,  $T_a=300\text{K}$ )

단 가장자리로부터 30 mm 위치에서는 매연분포의 극대를 나타내는 위치 및 극대값이 거의 같은 값을 나타내고 있는것에 반해, 하류로 진행함에 따라 극대를 나타내는 위치 및 분포에 큰 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 예를 들면,  $T_w=300\text{ K}$ 의 경우, 화염 선단 가장자리에서 90 mm의 위치에서는 벽면 근방에서도 고농도로 존재하고 있는것에 반해, 800 K때에는, 버너 표면 부근에는 거의 매연입자가 존재하고 있지 않다. Fig. 5의 결과와 마찬가지로 매연 농도의 최대 위치가 벽면 온도에 의해 크게 변화하고, 이것과 더불어 분포의 폭도 벽면 온도의 상승과 함께 좁아지면서, 특정 범위에서 매연입자들이 집중하고 있는 경향을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 벽면 온도가 300 K 및 800 K때의 미소중력 실험 후의 버너 표면을 사진 촬영 한 것이다. 연료 분출구 직후의 위치에서의 검은 부분은 통상 중력장에서 착화시 부착한 것으로 무시하며, 어떤 경우에도 매연이 표면에 부착하는 현상이 생긴다. 그러나, 버너의 하류측(사진의 스케일로 70 mm보다 뒤의 위치)에서는, 미소 중력장에서의 화염으로부터가 매연입자의 부착이 없는 경우는 표면이 광택을 유지한 상태가 된다. 두 사진의 비교로부터 확실히 알 수 있듯



(a)  $T_w = 300\text{K}$



(b)  $T_w = 800\text{K}$

Fig. 7 Soot trace on the burner wall after the experiments( $\text{N}_2$  balance,  $U_f=8\text{mm/s}$ ,  $U_a=5\text{cm/s}$ ,  $\text{O}_2=35\%$ ,  $T_a=300\text{K}$ )

이, 벽면 온도를 상승 시킬 경우, 미소 중력환경에서는 하류측에서의 매연의 부착이 보이지 않는 지금까지의 관찰한 결과와 대응하는 결과를 나타내고 있다.

### 3.2 고찰

지금까지 벽면온도에 따른 화염내에서의 매연입자 거동 및 벽면으로의 매연입자 부착 특성에 대해서 서술했다. 앞의 실험결과에서 알 수 있듯이, 벽면 온도에 따라 매연입자의 부착 위치 및 거동이 크게 변화하는 것을 알 수 있었다. 이것은 벽면온도의 변화에 따라 화염중의 유동장 및 온도장의 변화로 인해 어느 힘이 매연 입자의 거동에 영향을 미치기 때문이라 할 수 있다.

Fig. 8에 매연입자에 작용하는 화염중의 힘들에 대한 개략도를 나타냈다. 일반적으로 매연 입자의 생성은 열분해 과정이므로, 반응대에서의 온도에 의존한다. 그리고 그 온도를 결정하는 것은 반응대로의 산소 공급량이다. 이 공급량은 분위기 가스중의 산소 농도, 분위기가스 유속 및 온도에 의존하는산소의 확산계수에 의해 결정된다. 이것들에 의해 화염장이 길어지면 유동장과 온도장에서의 영향범위가 넓게 되고, 화염온도가 높아지면 그 영향강도가 강하게 되어 화염형상은 크게 변할 뿐 아니라 부착에도 큰 영향을 미친다. 화염상류에서 생성된 많은 매연입자는 하류로 이동하는데, 이 이동하는 입자는 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 반응대의 고온열에 의한 체적팽창력(Flow force) 및 화염장의 높은 온도 구배에 의한 열영동(Thermophoresis)에 의한 힘을 받으면서, 이 두 힘이 균형을 이루는 위치를 따라 벽면방향으로 이동한다. 열영동 효과는 기체분자의 평균자유행정과 물질 크기의 비인 크누센수( $\text{Kn} = \lambda / L$ ,  $\lambda$ : 평균자유행정,  $L$ : 입자반경)의 크기에 의해 표현방식이 변화하며, 일반적으로 Kn수가 클수록 그 영향은 크게 된다 [7]. 열영동현상의 발생 원인은 입자가 고온측의 기체로부터 받는 운동량과 저온측에서 받는 운동량의 차에 의해 입자에 힘(열영동력)이 작용해 입자는 온도구배에 의해 저온측(벽면)으로 이동하게 되며, 이 열영동력은 온도구배가 증가 할수록 증가한다. 이 때, 매연입자는 화염대 근방에서는 열팽창력에 의한

영향을 많이 받게 되며, 벽면으로 이동 할수록 벽면의 낮은 온도지역으로 작용하는 열영동력의 영향을 받기 쉽다. 그 결과 벽면온도가 낮은 경우는 벽면근방에서의 열영동효과가 커 매연입자의 부착이 용이한 반면, 벽면 온도가 높은 경우는 벽면근방에서의 낮은 온도 구배로 인해 부착이 이루어지지 않게 된다. 그러나, 실험만으로 화염내의 현상을 완전히 파악하기는 힘들기 때문에, 차후 수치계산에 의한 좀 더 상세한 해석이 필요할 것으로 생각된다.

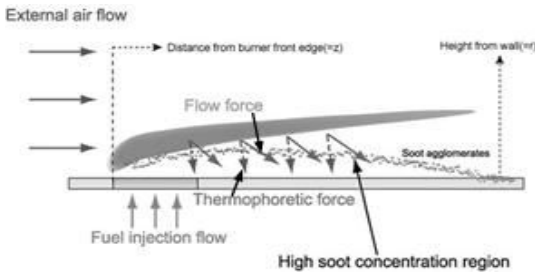


Fig.8 Physical model of soot particle motion under the effect of flow force and thermophoretic forces

#### 4. 결 론

본 연구에서는 미소 중력 환경을 이용하여 벽면 근방 확산화염을 형성시켜 벽면온도에 따른 화염내 매연입자의 부착 특성에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 미소중력환경을 이용함으로써, 부력의 영향을 받지 않는 벽면근방 확산화염의 형성시켜 처음으로 그 자리관찰(in-situ observation)에 따른 화염내 매연입자의 부착특성을 관찰하는데 성공했다. 벽면온도가 변화해도 화염의 위치는 그다지 변화하지 않는 것에 반해, 화염내 매연입자의 분포는 크게 변화하였다.

(2) 벽면온도가  $T_w=300$  K의 경우,  $z=90$  mm의 위치에서 매연입자가 고농도로 존재하고 있는 것에 반해, 800K때에는, 버너 표면 부근에서 거의 매연입자가 존재하지 않았다. 즉, 벽면온도가 상승함에 따라 고체벽면으로의 매연 입자 부착량은 감소한다.

(3) 벽면온도에 따른 매연입자 체적분을 최대값의 차이는 거의 없었다. 이것은 벽면온도는 화염내의 매연입자의 생성에는 그다지 큰 작용을 하지 않는다는 것을 의미한다.

(4) 벽면온도가 낮은 경우 매연입자는 고체벽면을 향하여 이동하는 반면, 벽면 온도가 높은 경우 매연입자의 부착이 억제되었다. 이것은 연소로내에서 전열관의 온도가 높은 경우에는 매연입자의 부착량이 적어진다는 것을 의미한다.

#### 참고문헌

- [1] P. J. Hiltz, New York Times, p. A1, July 19 1993.
- [2] R.Viskanta and M. P.Menguc, Prog. Energy combust. Sci.13:97, 1987.
- [3] R. FConolly, ; P. H. Kelsell, "A direct assessment in 60 MW(e) oil-fired boilers of the limitation of good practices in combating acid deposition and associated smut emission and the consequent use of a neutralizing additive", Sci. Serv. Dep., CEGB, UK. Journal of the Institute of Energy, 55 (422), pp.47-54, 1982.
- [4] M. S. Joanne, W. Alan and H. Douglas, "Soot and carbon Deposition Mechanisms in ethane/air flames", Fuel Vol. 74 No.12, pp.1753-1761, 1995.
- [5] T. Pushkar, P. T. James, F. Amy.R.Xiaodong, "Estimation of Particle Volume Fraction, Mass fraction and Number density in Thermophoretic deposition systems", J. Heat and Mass Transfer 46, pp.3201-3209, (2003).
- [6] H. Ono, R. Dobashi and T. Sakuraya, "Thermophoretic velocity measurement of soot particles under a microgravity condtion" Proc.CombustionInsitute,Vol.29, pp.2375-2382,2002.
- [7] L. Waldmann, "On the motion ofspherical particles in nonhomogeneous gases in Rarefied Gas Dynamics" (L.Talbot, ed.,Academic Press Inc., pp.323-344, 1961.