

## 고체의 벽면온도에 따른 고온가스 내의 입자거동에 대한 실험 및 수치해석 연구

최재혁\* · 이기영\*\* · 윤두호\*\*\* · 윤석훈\*\*\*\* · 최현규\*\*\*\*\* · 최순호†  
(원고접수일 : 2006년 3월 13일, 심사완료일 : 2006년 5월 3일)

### Experimental and Computational Studies on Particle Behavior in High Temperature Gas with the Various Temperatures of a Solid Wall

Jae-Hyuk Choi\* · Ki-Young Lee\*\* · Doo-Ho Yoon\*\*\* · Seok-Hun Yoon\*\*\*\* ·  
Hyun-Kue Choi\*\*\*\*\* · Soon-Ho Choi†

**Abstract** : The effect of a wall temperature 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. The fuel for the flames was an ethylene ( $C_2H_4$ ). The surrounding oxygen concentration was 35% with surrounding air temperatures of  $T_a=600 K$ . In the study, three different wall temperatures,  $T_w=300, 600, 800 K$ , were selected as major test conditions. Laser extinction was adopted to determine the soot volume fraction distribution between the flame and burner wall. The experimental results showed that the maximum soot volume fractions at  $T_w=300, 800 K$  were  $8.8 \times 10^6, 9.2 \times 10^6$ , respectively. However, amount of soot deposition on wall surface was decreased because of lower temperature gradient near the wall with increasing wall temperature. 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 from the numerical simulation successfully predicted the differences in the motion of soot particles by different wall temperature near the burner surface and are in good agreement with observed soot behavior, that is, the "soot line", in microgravity.

**Key words** : Combustion(연소); Diffusion flame(확산화염); Microgravity(미소중력); Radiation medium (복사매체); Soot deposition(매연부착); Soot particles(매연입자); Thermoporesis (열영동); Volume fraction (체적분율)

† 책임저자(한국해양대학교, 기관시스템공학부, M258), E-mail:choi\_s\_h@naver.com, Tel:(051) 410-4266

\* 한국원자력연구소, 원자력수소사업추진반

\*\* 한국원자력연구소, 원자력수소사업추진반

\*\*\* 한국해양대학교, 기관시스템공학부

\*\*\*\* 창원기능대학, 컴퓨터응용 기계설계학과

\*\*\*\*\* 군산대학교, 동력기계시스템 공학부

## 1. 서 론

연소장치로부터 배출되는 매연(Soot)은 인체에 유해한 배기성분으로 알려져 있는 반면에, 화염중에서는 복사매체로서의 역할을 수행하므로 가열로 등에서는 열전달에 중요한 역할을 하는 양면성을 동시에 가지고 있다<sup>(1,2)</sup>. 하지만 보일러, 스팀리포머 및 화학반응 프로세스와 같이 반응온도의 제어를 위해서 반응로의 내부에 전열관이 설치된 경우에는 이들 매연입자는 전열관의 표면이나 노벽에 부착해 열저항(Thermal Resistance)으로 작용하는 관계로 전열효과를 현저히 악화시킨다<sup>(3)</sup>. 따라서 이러한 매연입자의 생성조건 및 부착거동은 연소분야에서 매우 중요하나, 현재까지 화염중에서 매연입자의 표면부착에 관한 메커니즘을 입증한 연구는 발표된 적이 없다.

화염내부의 매연입자가 벽면으로 부착할 경우 온도구배(Temperature Gradient)가 형성된 가스유동장을 구성하는 유체와 매연입자 상호간의 운동량교환에 의한 열영동(Thermoporesis)효과가 지배적이며, 특히 매연입자가 부착되는 벽면근방의 경우에는 온도구배가 매우 크기 때문에 열영동 효과가 아주 중요한 역할을 한다<sup>(3)-(7)</sup>.

Dobashi<sup>(6),(7)</sup> 등은 미소중력환경을 이용한 실험을 통해 온도가 다른 상하 2장의 판 사이에 형성되는 온도구배장의 화염에서 채취한 매연입자 등의 미립자를 분산시켜 상하 벽면으로 이동하는 입자의 거동을 관찰하였다. 이 때 판 사이 온도구배가 클수록 입자는 벽면으로 더욱 원활하게 이동한다는 것을 실험으로 증명하였다. 또한 Choi 등은 벽면근방 확산화염 내부에 생성되는 매연입자에 작용하는 열영동 현상을 파악하기 위해 주위 산소농도<sup>(8)</sup>, 주위 공기온도<sup>(9)</sup>, 고체의 벽면온도<sup>(10)</sup>에 따른 영향에 대해서 조사하였다.

이들의 연구결과에 의하면 주위의 산소농도가 높을수록, 공기온도가 높을수록, 벽면온도가 낮을수록 매연입자는 고체벽면으로의 부착이 잘 이루어졌으며, 이 때 벽면근방에서는 열영동효과가 아주 중요한 역할을 하고 있음을 밝히고 있다. 하지만 이들 기존연구에서도 노가 작동할 때 매연입자의 부착현

상에 지대한 영향을 미칠 것으로 예상되는 노 내부에 설치된 전열관의 표면온도, 즉 전열벽면의 온도에 따른 매연입자의 부착현상에 대한 해석은 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 저자들에 의해 수행된 이전 연구<sup>(10)</sup>의 후속연구로서 주위 공기온도가  $T_a=600\text{ K}$  인 벽면 근방의 확산화염 내 연소부산물로 발생하는 매연 입자들의 거동을 관찰하였다. 이전 연구<sup>(10)</sup>에서는  $T_a=300\text{ K}$  일 때의 화염내 매연입자의 거동을 파악하였는데, 실제 보일러 등의 열교환기 내부의 거동상태를 파악함에 있어서는 고온공기 연소에 따른 영향을 파악할 필요가 있다. 고온공기 연소관 일반적으로 1100 K 이상의 연소상태를 말하나, 본 연구의 미소중력 실험에서는 실험공간 및 전력 등의 문제로  $T_a=600\text{ K}$ 로 설정하였다. 그리고 화염으로부터 고체벽면으로의 매연 부착현상은 레이저 투과법에 의한 동시관찰(In-situ Observation)을 통해서 수행하였으며, 특히 부착현상에 가장 큰 영향을 미치는 벽면온도를  $T_w=300, 600, 800\text{ K}$ 로 변화시켜 벽면온도의 영향 및 주위의 공기온도와 벽면온도의 상관관계에 대하여 비교 및 조사를 수행하였다. 더욱이, 본 연구에서는 수치해석을 통하여 화염 내부의 유동장 및 온도장을 파악함은 물론, 벽면온도에 따른 화염의 형성위치, 주위 유동장에 의해 결정되는 대류이동 및 온도 구배장에 의해 생기는 열영동 현상을 파악함으로써 매연입자가 벽면에 부착할 때 어떤 요인이 지배적인 영향을 미치는지에 대해서도 조사하였으며, 벽면 근방의 안정된 화염생성을 위한 실험은 일본의 무중력 실험센터(JAMIC)의 미소중력환경(500 m 자유 낙하탑)을 이용하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

버너 및 실험 장치에 대한 상세한 설명은 전 연구<sup>(8)-(10)</sup>에서 이미 자세히 기술된 관계로 본 연구에서는 간략히만 언급한다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 원통버너의 외관을 보이는 것으로서 고체벽면에 평행한 안정된 확산화염을 형성하기 위해서 직경 30 mm, 길이 210 mm의 원통형의 버너를 이용하였다. 원통버너의 일부에는 소결금속으로 만들

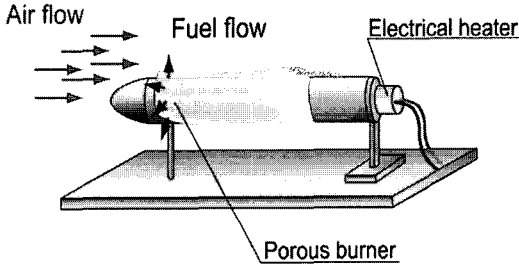


Fig. 1 Schematic diagram of a cylindrical burner

어진 폭 20 mm의 다공질의 연료 분출구가 있으며, 이 분출구로부터 연료( $C_2H_4$ )가 0.8 cm/s의 속도로 분출된다. 본 실험의 주요인자인 벽면온도 ( $T_w=00, 600, 800 K$ )는 원통형 버너의 내부에 카트리지형의 전기히터를 삽입하여 조절하였다.

실험장치의 시험부는 내부치수 255(L)×130(W)×85(H) mm의 단열된 알루미늄제의 덕트로 구성되었으며, 산소농도 35 %( $N_2$  Balance)의 주위가스는 축열식 예열장치에 의해  $T_a=600 K$ 로 예열된 후 버너에 평행하게 일정한 속도로 화염에 공급된다. 연소 현상은 상부에 설치한 디지털 비디오카메라를 이용하여 촬영하였으며, 측면에서는 반도체 레이저(파장  $532 \pm 5 nm$ , 최대출력 150 mW)를 이용하여 투과광 영상을 취득했다. 매연입자의 2차원적인 분포는 미소중력환경에서 생성된 축대칭 구조의 안정된 확산 화염에 레이저를 조사(照射)하여 카메라에 획득된 투과광의 감쇠상으로부터 아벨축 대칭변환을 행하여 매연입자의 분포를 구하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 주위 공기온도  $T_a=600 K$ , 벽면온도  $T_w=300, 600, 800 K$ 때의 미소중력환경에서 촬영한 직접 영상과 투과광의 감쇠상을 나타낸다. 실험조건으로는 공기유속 5 cm/s(상온 환산), 연료 분출속도 0.8 cm/s(주류 속도의 0.16배), 공기중의 산소농도는 35%이다. 우측의 투과광 영상은 광학계의 시야 관계로 버너의 상반부의 화염만을 촬영하고 있다. 각 투과광의 영상에서 아래쪽의 검은 부분은 원통형 버너의 그림자이고, 위쪽은 덕트에 장착된 창 의 상단 까지이다.

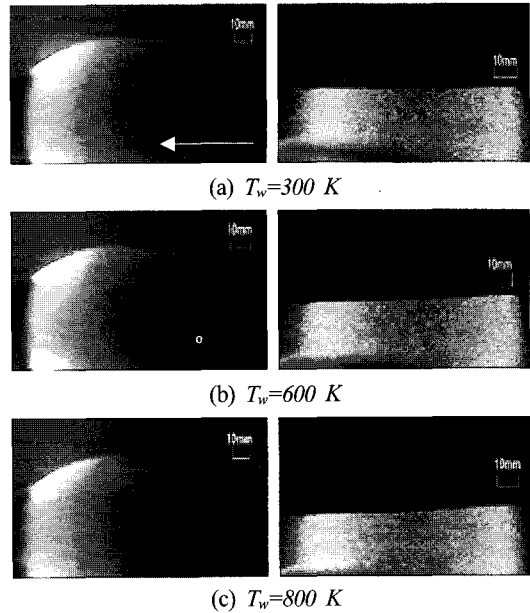


Fig. 2 Direct and extinction images with the different wall temperatures

Fig. 2 내의 화살표는 중력가속도의 방향을 보이는 것이다. Fig. 2의 각각의 벽면온도에 따른 화염의 형상을 비교해 보면, 이전의 연구들<sup>[8-9]</sup>에서는 주위의 공기온도나 주위의 산소농도의 차이에 따른 연료 속도벡터의 변화와 화염반응대 근방에서의 산화제 공급량에 따라 화염의 위치나 화염휘도가 크게 변화하였으나 본 연구에서는 벽면온도에 따른 화염 위치나 화염휘도 등 육안으로 관찰되는 범위에서는 그 차이를 구분할 수는 없었다. 특히 주위의 공기온도가 300 K인 경우 이전의 연구<sup>[10]</sup>에서는 벽면온도가 증가함에 따라 화염중의 매연분포가 벽면에서 멀어지는 경향을 보였으나,  $T_a=600 K$ 인 본 연구에서는 벽면온도에 따른 매연분포 또한 큰 변화가 없었다.

Fig. 3은 화염면의 위치와 매연입자의 응집영역을 정량적으로 판단하기 위한 두 개의 위치관계를 나타낸다. 화염의 외측경계에서 정의한 화염면의 위치는 “flame line”으로 표시되어 있고 감쇠율이 가장 높은 위치를 “soot line”으로 표기했다. Fig. 3에서 벽면온도에 따른 화염면의 위치와 매연입자의 분포는 벽면온도의 상승에 따라 약간 벽면으로부터

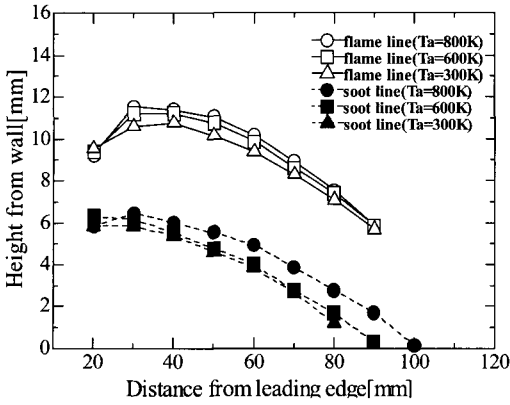
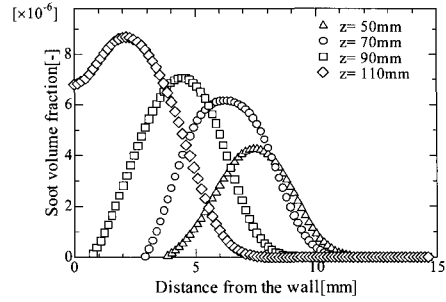


Fig. 3 Comparison of a flame line and a soot line with the different wall temperatures ( $U_f=8\text{ mm/s}$ ,  $U_a=5\text{ cm/s}$ ,  $O_2=35\%$ ,  $T_a=600\text{ K}$ ,  $N_2$  balance)

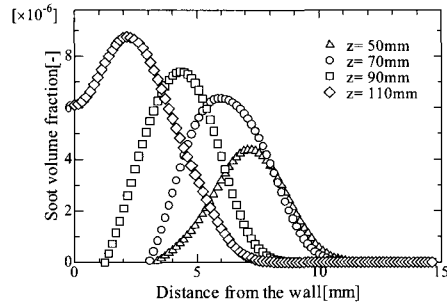
떨어지는 경향을 나타내고 있으나 그 변화는 적다. 그러나 Fig. 3에서 확실히 알 수 있듯이 매연입자의 분포위치는 화염면의 위치보다 훨씬 벽면쪽에 위치하고 있다.

Fig. 4는 매연 입자의 농도분포를 정량적으로 판단하기 위해 각 벽면온도에 따른 화염의 선단 가장자리(다공질 분출부의 상류측단이 원점)로부터의 거리가 각각 50, 70, 90, 110 mm의 위치에서 구한 매연의 체적분율의 반경방향 분포를 나타낸 것이다. 이 분포를 구하기 위해 화염은 완전한 동심원상의 구조를 가지고 있다고 가정하였으며, 투과광으로부터 얻은 2차원 화상으로부터 아벨축 대칭변환을 행하여 반경방향 감쇠율의 분포를 구한 후, 레이리 산란이론(매연의 일차 입자경을 상정해 입경 파라미터  $\pi D/\lambda \langle I \rangle$ 을 가정,  $D$ : 매연의 입경,  $\lambda$ : 레이저의 광파장, 입자는 구형으로 가정)에 의해 주어지는 감쇠계수<sup>[11]</sup>를 Bouguer-Lambert-Beer의 법칙을 도입해 매연의 체적분율 분포를 산출한 결과이다.

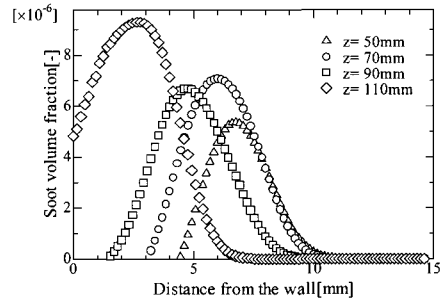
Fig. 4로부터 매연입자의 체적분율은 앞에서 서술한 바와 같이 벽면온도의 상승과 더불어 분포영역은 벽면으로부터 멀어지는 경향을 나타내고 있지만 그 경향은 주위공기온도가 300 K일 때보다 작다. 그리고 화염중의 매연입자의 극대 체적분율은 벽면온도가 800 K일 때 가장 높고,  $z=110\text{ mm}$ 의 벽면근방에서의 체적분율이 가장 낮았다.



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



(b)  $T_w=600\text{ K}$

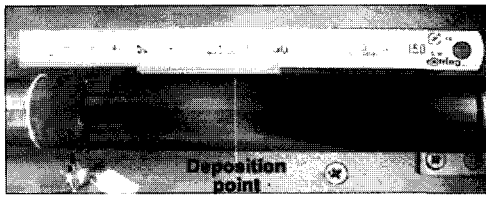


(c)  $T_w=800\text{ K}$

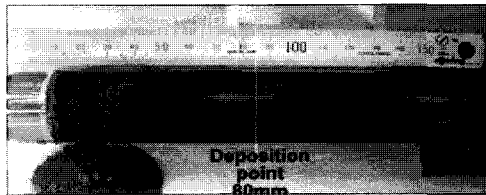
Fig. 4 Comparison of soot volume fractions with the different wall temperatures ( $U_f=8\text{ mm/s}$ ,  $U_a=5\text{ cm/s}$ ,  $O_2=35\%$ ,  $T_a=600\text{ K}$ ,  $N_2$  balance)

Fig. 5는 주위의 공기온도가 600 K때의 미소중력 실험후의 버너표면을 촬영한 것이다. 각 벽면온도에 따른 매연 입자의 부착 위치는 크게 변화가 없으며 Fig. 4의 매연입자 체적분율과 동일한 경향을 나타내고 있다. 그러나 그 부착량은 벽면온도가 증가함에 따라 감소하고 있다.

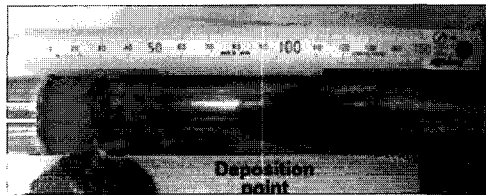
Fig. 6은 주위의 공기온도가 300 K<sup>[10]</sup>, 600 K일 때



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



(b)  $T_w=600\text{ K}$



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

Fig. 5 Soot trace on the burner wall after the experiments ( $U_f=8\text{ mm/s}$ ,  $U_a=5\text{ cm/s}$ ,  $O_2=35\%$ ,  $T_a=600\text{ K}$ ,  $N_2\text{ balance}$ )

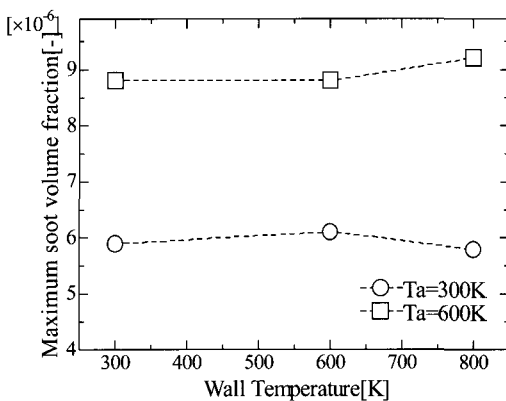


Fig. 6 A relation between the surrounding air temperature and the wall temperature on the maximum soot volume fraction ( $U_f=0.8\text{ cm/s}$ ,  $V_a=5\text{ cm/s}$ )

의 각 벽면온도에 따른 매연입자 체적 분율의 최대치를 나타낸다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 주위의 공기온도가 높을수록 매연의 입자량은 크게 증가하나 벽면온도의 상승에 따른 값은 두 경우 모두 그다지 변화하지 않으며, 따라서 이 결과로부터 벽면온도는 매연입자의 생성에는 커다란 영향을 미치지 않는음을 확인할 수 있다.

## 4. 수치해석

### 4.1 계산방법

지금까지의 실험결과로부터 벽면온도에 따른 화염내 매연입자의 분포가 다르다는 것을 알았다. 이것은 벽면온도에 따른 화염내 유동장 및 온도장이 변화함으로써 매연입자에 영향을 미치기 때문이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 통하여 본 연구 대상인 미소중력 환경하에서의 벽면근방 확산화염에 대하여 좀 더 상세하게 그 특성을 알아보았다.

수치해석 방법에 관한 내용은 이전의 연구<sup>[8,9,12]</sup>에 구체적으로 서술한 관계로 본 연구에서는 간략히 기술하기로 한다.

기초방정식은 질량, 운동량, 에너지, 화학성분 및 기체의 상태방정식이며<sup>[13]</sup> 반응속도정수는 Arrhenius형 반응식을 이용하여 계산하였다. 계산영역은 실제 연소실과 동일한 조건으로 설정하였으며, 버너의 반경 또한 실제의 실험에서 사용한 원통형 버너와 같은 반경인 15mm로 하였다. 좌표의 원점은 z축상에서 버너의 앞쪽 가장자리로부터 14mm의 지점을 취했으며, 원통좌표계를 이용하여 반경방향 및 축방향을 각각 r 및 z로 했다. 계산을 위한 격자계는 균일한 간격으로 128(r)×512(z)의 격자점을 취하도록 분할하였다.

화학반응은 1차의 총괄반응이며 따라서 낮은 마하수 가정(Low Mach Number Approximation)을 적용하였고, 계산의 단순화를 위해서 Soret-Dufour 효과, 복사에 의한 열손실, 부력효과와 압력구배에 의한 확산효과는 무시하였다. 뿐만 아니라 연료와 주위의 공기속도는 균일속도(uniform velocity)로 가정하였으며, 벽면조건은 버너부분을 제외한 벽면에는 미끄

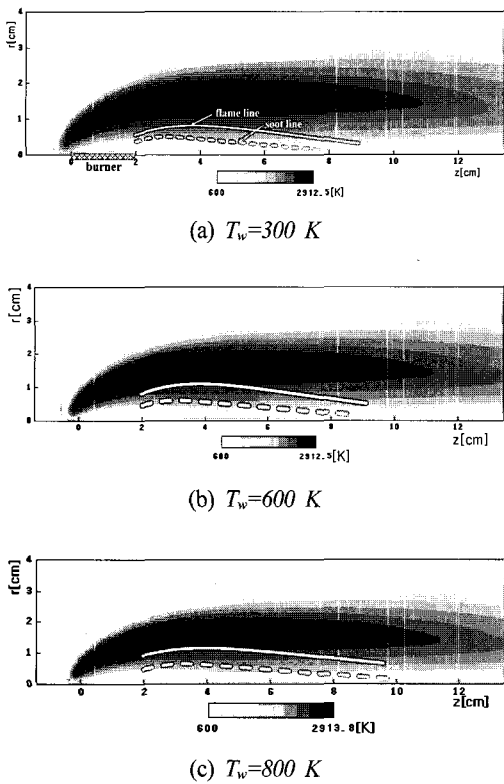


Fig. 7 Simulated temperature distributions

럼이 존재하지 않는 No-slip Condition을, 그리고 출구조건은 대류경계조건(Convective Boundary Condition)을 적용하였다<sup>[14]</sup>. 계산에 필요한 열역학적 물성치들과 열전달계수는 Chemkin III와 Transport Package를 이용하여 해석하였다<sup>[15],[16]</sup>.

4.2 수치해석 결과 및 열영동 효과

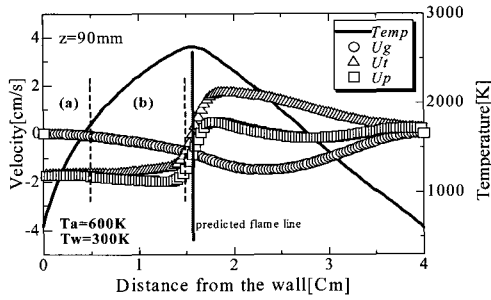
Fig. 7은 주위 공기온도가 600 K일 때의 각 벽면온도에 따른 온도분포를 보인 것이다. 계산 조건은 Fig. 2의 실험조건과 동일하며, Fig. 7 내의 실선과 점선은 Fig. 3의 화염면 위치(Flame Line)와 매연의 응집영역(Soot Line)을 나타낸다. 결과는 Fig. 2의 경향과 동일하게 벽면온도에 따른 차이는 거의 없음을 알 수 있으며, 따라서 벽면온도는 화염의 강도, 매연입자의 생성 및 화염면의 위치에는 크게 영향을 미치는 지배인자가 아님을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 입자의 수송에 미치는 열영동효과의 영향에 대해서도 검토하였으며, 열영동 효과란 서론부분에서 언급한 바와 같이 미소입자가 온도구배하에서 입자가 고온측의 기체로부터 받는 운동량과 저온측의 기체로부터 받는 운동량에 차이가 생겨 입자와 주위 유체와의 사이에 Drift 속도(열영동 속도)가 발생하는 현상이다. 일반적으로 입자는 저온측으로 향하는 힘을 받아 온도구배에 따라 저온측으로 이동한다. 이 효과는 기체분자의 평균자유행정(Mean Free Path)과 물질의 스케일 비인 크누센수 ( $K_n = \lambda/L$ ,  $\lambda$ : 평균자유행정,  $L$ : 입자반경)의 크기에 따라 변화하며, 통상은  $K_n$ 가 커지는 만큼 그 영향이 커진다고 알려져 있다<sup>[17]</sup>. 매연입자는 화염중에서 큰 응집체가 되어 외관상 다양한 입경(粒徑)을 가지지만 미소중력환경에서는 가스의 체류시간이 길어져 응집체의 지름이 커진다는 사실이 보고되고 있다<sup>[18,19]</sup>. 이에 반해 Ono<sup>[7]</sup> 등은 매연입자에 작용하는 열영동효과를 분석하기 위해 온도구배 및  $K_n$ 의 변화에 의한 Drift속도 데이터를 화염에서 채취한 매연입자를 이용해 조사하였으며, 그 결과에 의하면 매연입자가 응집된 집합체의 지름변화에 대한 drift 속도의 변화는 적다는 연구결과를 발표하였다. 이것은 매연입자가 응집 후에도 그 내부에 많은 공극(空隙)을 가져 매연입자에 작용하는 열영동력이나 점성력은 매연입자의 응집 후의 지름이 아니고 개개 1차입자의 지름에 의해 지배되고 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 자유분자 흐름영역에 대한 예측식인 식(1)의 Waldmann 방정식을 이용하여 화염중에서의 열영동속도를 구해, 1차입자인 매연에 작용하는 힘에 대해서 조사하였다.

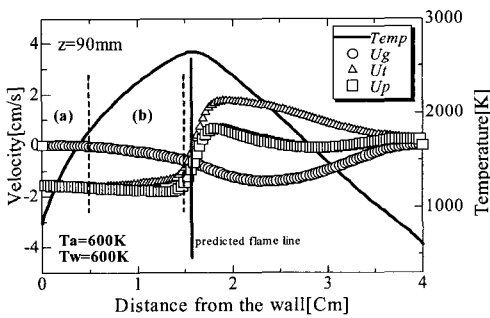
$$U_t = - \frac{3\nu}{4(1 + \frac{\pi}{8} \alpha_m)} \cdot \frac{\nabla T}{T} \tag{1}$$

상식에서  $\nu$ 는 동점성계수,  $\nabla T$ 는 온도구배,  $T$ 는 온도 그리고  $\alpha_m$ 은 적응계수이며, 본 연구에서는 1로 하였다<sup>[20,21]</sup>.

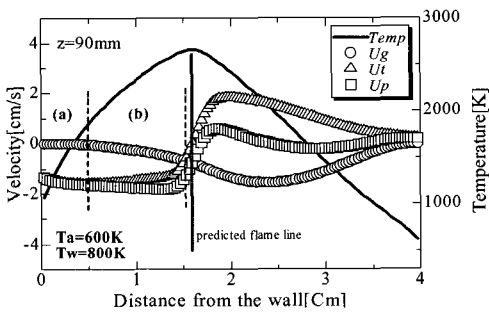
Fig. 8은 Fig. 7의 계산결과로부터  $z=90\text{ mm}$  위치에서의 열영동속도( $U_t$ ), 가스속도( $U_g$ ), 그리고 입자속도, ( $U_p = U_g + U_t$ ) 및 온도분포를 보인 것이다. 여기서 열영동속도  $U_t$ 는 자유분자의 흐름영역에서의 예



(a)  $T_w=300 K$



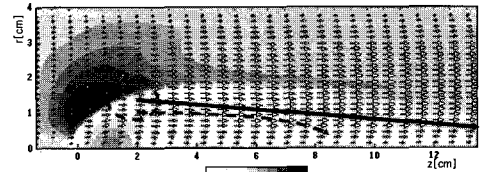
(b)  $T_w=600 K$



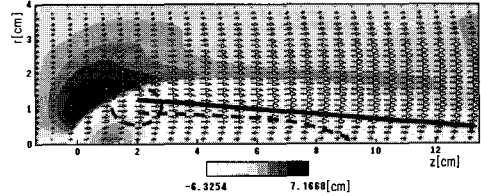
(c)  $T_w=800 K$

Fig. 8 Relation of thermophoretic velocity( $U_t$ ), gas velocity ( $U_g$ ), particle velocity( $U_p$ ) and temperature distributions at  $z=90 \text{ mm}$

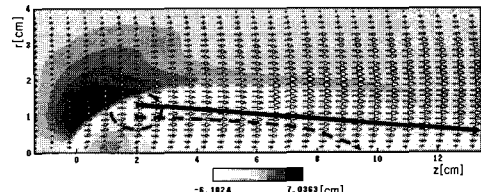
측식인 식(1)의 Waldmann식을 이용해 구하였다. Fig. 8 안에 보인 예측화염선(Predicted Flame Line)은 거의 같은 위치를 나타내고 있다. 이것은  $T_a=300 K$ 인 연구결과<sup>(10)</sup>와는 달리 주위의 공기온도  $T_a=600 K$ 인 경우 계산에서 사용된 벽면온도는 화염의 형상에 영향을 주지 않기 때문이다. 또 화염면에서 바깥쪽 공기층의 가스 속도를 살펴보면 부(負)의 속도를 나



(a)  $T_w=300K$



(b)  $T_w=600K$



(c)  $T_w=800K$

Fig. 9 Gas motion vectors ( $U_g+V_g$ ), particle velocity contours (shading,  $U_p$ ), soot lines considering the thermophoretic velocity (broken arrow) and soot lines without the thermophoretic velocity (solid arrow)

타내고 있다. 이것은 상류에서 하류로 흐르는 가스가 화염면 근처에서 화염면과 가스의 큰 온도차에 의해 팽창하고, 팽창된 가스는 상부벽에 충돌해 가스의 속도는 다시 부(負)가 되어 하류측으로 흐르기 때문인데 화염 하류의 edge가 하향(下向)이 되는 것은 이와 같이 가스속도가 부(負)의 값을 가지는 것이 그 원인이다.

Fig. 8을 두 개의 영역으로 나누어 고려하면, (a) 영역에서는 벽면 근방에서는 가스속도가 거의 0로 입자속도  $U_p$ 는 열영동속도  $U_t$ 에 의해 결정됨을 알 수 있는데 이는 벽면 근방에서는 열영동속도가 입자의 움직임을 지배하고 있음을 의미한다. 그러나  $T_a=600 K$ 의 경우 화염면이  $T_a=300 K$ 와 비교해서 벽면 근처에 위치하고 화염온도도  $T_a=300 K$ 보다 높

기 때문에 화염면에서 벽면으로의 열전달이 커져 벽면온도의 변화가 상대적으로 낮기 때문에 본 연구의 대상인 세 개의 벽면온도에 대해서는 열영동속도의 차이가 거의 없다. 이것은 벽면온도가 크게 다름에도 불구하고 세 경우 모두에 대해 매연입자가 벽면에 부착하게 된다는 것을 예상할 수 있다. 그러나  $T_w=800\text{ K}$ 인 경우 벽면근방에서 다른 경우보다 다소 적은 열영동속도값을 가지고 있는데, 이것은 Fig. 5에서 언급한 바와 같이 벽면에 부착하는 부착량이 적어지는 원인이 된다.

Fig. 9는 주위의 공기온도가  $T_a=600\text{ K}$ 일 때 벽면온도에 따른 매연입자의 벽면으로의 부착을 나타내는 것으로서 매연입자는 처음부터 유동장에 놓여져 있다고 가정하였다. Fig. 9에서 벡터는  $r$ 방향의  $U_g$ 와  $z$ 방향의  $V_g$ 를 합한 벡터이다. 흑백의 배경은  $r$ 방향에 있어서의  $U_p(U_g+U)$ 만을 나타낸 것이다. 실선의 화살표는 열영동효과를 고려하지 않은 soot line이며, 점선의 화살표는 혼합기체의 대류속도에 열영동속도를 합한 soot line이다. 시작점은 버너로부터의 연료속도와 화염으로부터의 열에 의해 팽창된 주위 기체가 어울리는 점으로 했다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 열영동속도를 고려하지 않은 경우는 입자의 속도가 가스의 속도와 같고 그대로 하류측으로 흘러가 버린다. 또 점선으로 표시한  $\circ$ 부분을 보면 약간의 차이는 있지만 세 경우 모두 비슷한 위치이며, Fig. 8에서 알 수 있듯이 연료측의 열영동속도 및 입자속도의 차이도 작기 때문에 매연입자는 세 경우 모두 비슷한 위치에 부착하게 된다. 이 결과로부터 벽면근방 확산화염내 매연입자의 부착거동을 파악하기 위해서는 열영동효과를 고려하는 필수적임을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 미소중력환경을 이용하여 벽면 근방 확산화염을 형성시켜 벽면온도에 따른 화염내 매연입자의 부착특성에 관한 실험 및 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 미소중력환경을 이용함으로써, 부력의 영향을 받지 않는 벽면 근방의 확산화염을 형성시켜 동시

관찰(In-situ Observation)에 따른 화염내 매연입자의 부착특성을 관찰하는데 성공하였다. 주위의 공기온도  $T_a=600\text{ K}$ 인 경우 벽면온도에 따른 화염길이 및 형상등의 변화는 적었으며, 특히 벽면에서 가까운 화염면의 위치와 연료측의 비슷한 온도구배로 인해 화염내 매연입자의 응집영역과 매연입자의 부착위치는  $z=75\text{ mm}-80\text{ mm}$  부근으로 벽면온도에 따른 차이가 적었으나, 화염내 최대 매연 체적 분율은  $T_w=300\text{ K}$ 일 때  $8.8 \times 10^6$ ,  $T_w=800\text{ K}$ 일 때는  $9.2 \times 10^6$ 로 약간 상승하였으나, 버너 벽면으로의 매연 부착량은 벽면온도가 증가할수록 벽면근방에서의 적은 온도 구배로 인해 감소하는 경향을 보였다.

(2) 실험과 수치해석 결과 모두 열영동효과에 의해서 매연입자가 벽면에 가까워지는 것을 확인하였으며, 특히 수치해석 결과로부터 열영동효과를 고려하지 않은 경우에는 고체벽면 위에 매연입자는 전혀 부착하지 않았다. 이것은 열영동현상의 고려가 확산화염중의 매연입자의 부착거동을 결정하는데 있어서 불가결한 요소인 것을 나타낸다.

(3) 자유분자 흐름영역의 예측식인 Waldmann 방정식에 의해서 계산된 결과는 미소중력 환경에서의 고체 벽면에 평행하게 형성되는 층류확산화염 중에 있어 관찰된 매연입자의 거동과 좋은 일치를 보였다. 이것은 미소중력 환경하에서의 확산화염중의 매연에 대한 열영동효과를 조사할 때 자유분자 흐름 영역의 가정이 타당함을 나타낸다.

## 참고문헌

- [1] P.J. Hilts, "New York Times", pp.A1, 1993.
- [2] R. Viskanta, and M.P. Menguc, "Radiation Heat Transfer in Combustion Systems", Prog. of Energy Combust. Sci. Vol.13, pp.97-160, 1987.
- [3] P. Adomeit and U. Renz, "Deposition of Fine Particles from a Turbulent Liquid Flow: Experiments and Numerical Predictions", Chemical Eng. Sci., Vol.51, No.13, pp.3491-3503, 1996.
- [4] D.G. Thakurta, M. Chen, J.B.



- Mclaughlin, and K. Kontomaris, "Thermophoretic Deposition of Small Particles in a Direct Numerical Simulation of turbulent Channel Flow", *Int. J. of Heat & Mass Transfer* Vol.41, pp.4167-4182, 1998.
- [5] R. Tsai, L.J. Liang, "Correlation for Thermophoretic Deposition of Aerosol Particles onto Cold Plate", *J. of Aerosol Sci.*, Vol.32, pp.473-487, 2001.
- [6] R. Dobashi, Z.W. Kong, A. Toda, N. Takaashi, M. Suzuki, and T. Hirano, "Mechanism of Smoke Generation in a Flickering Pool Fire", *Proc. of 6th Fire Safety Science*, pp.255-264, 1999.
- [7] H. Ono, R. Dobashi and T. Sakuraya, "Thermophoretic Velocity Measurement of Soot Particles under a Microgravity Condition", *Proc. Combustion Institute*, Vol.29, pp.2375-2382, 2002.
- [8] J.H. Choi., O. Fujita., T., Tsuiki., J. Kim and S.H. Chung., "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", *Int. J. of JSME(B)*, Vol.48, No.4, pp.839-848, 2005.
- [9] J.H. Choi., O. Fujita., T., Tsuiki., J. Kim and S.H. Chung., "In-situ Observation of the Soot Deposition Process on a Solid Wall with a Diffusion Flame along the Wall", *Int. J. of JSME(B)*, Vol.49, No.1, pp.167-175, 2006.
- [10] 최재혁, 후지타오사무, "미소중력환경을 이용한 벽면근방 확산화염내 매연부착거동의 원위치 관찰", *한국마린엔지니어링학회지*, 제 29권, 8호, pp.907-914, 2005.
- [11] *Laser Handbook* (in Japanese), 丸善, pp.239, 1993.
- [12] 최재혁, 후지타 오사무, "미소중력환경내의 벽면근방 확산화염 특성에 관한 수치해석", *한국마린엔지니어링학회지*, 제30권, 1호, pp. 140-149, 2006.
- [13] F.A. Williams, *Combustion Theory* (2th), The Benjamin Cummings Publishing Company, 1985.
- [14] S. Mahalingam, B.J. Cantwell, and J.H. Ferziger, "Non-premixed Combustion: Full Numerical Simulation of a Coflowing Axisymmetric Jet, Inviscid and Viscous Stability Analysis", Report TF-43, Thermoscience Div. Stanford University, California, 1989.
- [15] R.J. Kee, F.M. Rupley, E. Meeks, and J.A. Miller, "CHEMKIN-III: A FORTRAN Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical and Plasma Kinetics", Report SAND96-8216, Sandia National Lab., Livermore, CA, 1996.
- [16] R.J. Kee, J. Warnatz, and J.A. Miller, "A FORTRAN Computer Code Package for the Evaluation of Gas Phase Viscosities, Conductivities and Diffusion Coefficients", Report SAND 83-8209, Sandia National Lab., Livermore, CA, 1996.
- [17] L. Waldmann, "On the Motion of Spherical Particles in Nonhomogeneous Gases", in *Rarefied Gas Dynamics*, Academic Press, pp. 323-344, 1961.
- [18] H. Ito, O. Fujita, K. Ito, "Agglomeration of Soot Particles in Diffusion Flames under Microgravity", *Combust. Flame*, Vol.99, pp. 363-370, 1994.
- [19] O. Fujita and K. Ito, "Observation of Soot Agglomeration Process with Aid of Thermophoretic Force in a Microgravity Jet Diffusion Flame", *Experimental Thermal and Fluid Sci.*, Vol.26, Issues2-4, pp.305-311, 2002.
- [20] L. Talbot, R.K. Cheng, R.W. Schefer and D.R. Willis, "Thermophoresis of Particles in

a Heated Boundary Layer”, J. of Fluid Mech., Vol. 101, pp.737-758, 1980.

- [21] J.R. Brock, “On the Theory of Thermal Forces Acting on Aerosol Particles”, J. of Colloid Sci., Vol.17, pp.768-780, 1962.

**저 자 소 개**



**최재혁 (崔宰赫)**

1974년 3월생, 1996년 한국해양대학교 기관공학과 졸업(공학사), 2000년 동대학교 대학원 석사과정수료(공학석사), 2005년 일본북해도대학교 대학원 박사과정수료(공학박사), 2005년-현재 한국원자력연구소(KAERI) 연구원.



**이기영 (李基英)**

1955년 2월생, 1978년 한양대학교 기계공학과 졸업, 1982년 한국과학기술원 기계공학과 공학석사, 1986년-현재 한국원자력연구소 기술총괄실장.



**윤두호 (尹斗好)**

1956년 1월 15일생, 1991년 부경대학교 졸업(공학사), 1994년 한국해양대학교 대학원 석사과정수료(공학석사), 2001년 한국해양대학교 대학원 박사과정수료(공학박사), 1996년~현재 한국폴리텍VII 대학 기계설계과 교수.



**윤석훈 (尹錫勳)**

1954년 8월생, 1977년 한국해양대학교 기관학과 졸업(공학사), 1980~1982 한국기계연구원(KIMM) 연구원, 1984년 인하대학교 대학원 석사과정수료(공학석사), 1985~1993 부경대학교 실습선기관장, 1992년 한국해양대학교 대학원 박사과정수료(공학박사), 2002년~2004년 University of Florida (U.S.A.) Courtesy Professor, 1993~현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수



**최현규 (崔顯奎)**

1975년 1월생, 1997년 군산대학교 기관공학과 졸업(공학사), 1999년 한국해양대학교(원) 기관공학과 석사과정수료(공학석사), 2004년 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 박사과정수료(공학박사), 2002년~2005년 (주)쓰리케이 엠아이텍 연구원, 2003년~현재 한국해양대학교 시간강사, 2005년~현재 군산대학교 시간강사.



**최순호 (崔淳豪)**

1961년 2월생, 1987년 한국해양대학교 선박기계공학과 졸업(공학사), 1989년 동대학원 석사과정수료(공학석사), 1989년 동의공업전문대학 시간강사, 1990년~1992년 (주)현대엔지니어링 설계직사원, 1992년~1996년 한국원자력연구소 선임연구원, 1997년 한국해양대학교 시간강사, 2002년 일본전열학회 우수논문상, 2003년 동경대학교 대학원 박사과정수료(공학박사), 2004년~2005년 한국기계연구원 비상근연구원, 한국학술진흥재단 박사후 과정, 2004년~현재 한국해양대학교, 동의과학대학 시간강사, 2005년 한국마린엔지니어링학회 장려논문상, 2006년판 세계인명사전 Marquis Who's Who in Asia등재, 2006년판 Marquis Who's Who in Science and Engineering 등재.