

## 버너의 벽면온도와 연소실내 주위공기온도에 따른 매연입자의 열영동 부착 특성에 관한 수치적 연구

최재혁† · 한원희\* · 윤두호\*\* · 윤석훈\*\*\* · 정석호\*\*\*\*

(원고접수일 : 2007년 8월 7일, 심사완료일 : 2007년 11월 26일)

### Numerical Study on the Thermophoretic Deposition Characteristics of Soot Particles for Wall Temperature of Burner and Surrounding Air Temperature in Combustion Duct

Jae-Hyuk Choi† · Won-Hui Han\* · Doo-Ho Yoon\*\* · Seok-Hun Yoon\*\*\* · Suk Ho Chung\*\*\*\*

**Abstract :** The characteristics of soot deposition on the cold wall in laminar diffusion flames have been numerically analyzed with a two-dimension with the FDS (Fire Dynamics Simulator). In particular, the effects of surrounding air temperature and wall temperature have been discussed. The fuel for the flame is an ethylene ( $C_2H_4$ ). The surrounding oxygen concentration is 35%. Surrounding air temperatures are 300K, 600K, 900K and 1200K. Wall temperatures are 300K, 600K and 1200K. The soot deposition length defined as the relative approach distance to the wall per a given axial distance is newly introduced as a parameter to evaluate the soot deposition tendency on the wall. The result shows that soot deposition length is increased with increasing the surrounding air temperatures and with decreasing the wall temperature. And the numerical results led to the conclusion that it is essential to consider the thermophoretic effect for understanding the soot deposition on the cold wall properly.

**Key words :** Diffusion flame(확산화염), Soot deposition length(매연부착거리), Thermophoretic effect(열영동 효과)

#### 1. 서 론

매연은 대기 오염물질의 하나인 입자상 물질

(Particulate Matter)로 환경오염을 비롯한 심각한 문제들을 일으키고 있다. 특히 내연기관의 실린더나 피스톤 헤드에 축적되는 매연입자는 오랜 기

† 교신저자(서울대학교 기계항공공학부 창의설계인력양성사업단), E-mail:jhhair@snu.ac.kr, Tel:02)880-1706

\* 목포해양대학교 기관시스템공학과

\*\* 창원기능대학, 컴퓨터응용 기계설계학과

\*\*\* 한국해양대학교, 기관시스템공학과

\*\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

간 동안 엔진의 마모와 부유입자의 방출원인으로 매연입자를 제거 및 억제하기 위한 많은 연구가 이루어졌다<sup>[1]</sup>. 한편 화염중에 생성되는 매연입자는 공업적으로는 중요한 복사매체이며 화로나 보일러에서는 피열체나 전열관으로 열을 효과적으로 전달하기 위한 중요한 역할을 하나, 보일러와 같은 노내에 전열관이 설치된 경우에는 매연입자가 온도구배에 의해 발생하는 열영동(Thermophoresis)에 의해 전열관이나 노벽에 부착하여 열전달 성능을 악화시킬 가능성도 있다. 따라서 매연입자의 효율적인 이용을 위해 열영동에 의한 매연 입자의 거동 및 부착특성을 파악하는 것은 아주 중요한 과제이다. 특히, 화염내에는 큰 온도구배가 존재하기 때문에 열영동력(Thermophoretic force)의 영향은 무시할 수 없다.

열영동(Thermophoresis)이란 온도구배가 존재하는 곳에 놓여진 입자가 저온측으로 향해 작용하는 힘을 받는 현상이다. 이 때 작용하는 힘을 열영동력이라하며 입자에 작용하는 힘이 열영동력과 기체의 점성저항력만 존재할 때 입자의 평균속도를 열영동속도(Thermophoretic velocity)라 한다. 이러한 열영동현상은 매연입자의 거동에 대한 영향뿐만 아니라 열교환 전열벽으로의 입자의 축적에 의한 효율저하<sup>[2]</sup> 및 추적자(tracer)입자를 흐름에서 벗어나게 하는<sup>[3]</sup> 등 주변의 많은 경우에서 영향을 미치고 있다.

가스나 액체내의 에어로졸(Aerosols) 및 추적자(tracer) 등의 입자에 작용하는 열영동효과의 영향에 대해서는 많은 연구가 이루어졌다<sup>[4,5,6]</sup>. 그러나 복잡한 구조를 가진 매연에 작용하는 열영동효과에 대한 연구는 극히 제한적이며 신뢰할 수 있는 예측 방법 또한 찾기 어렵다. 특히, 화염의 경우 주위공기와 높은 온도 차이에 의한 부력의 영향으로 매연에 작용하는 열영동효과를 예측하기란 더욱 어려운 실정이다. 최근에 이러한 열대류의 영향을 받지 않는 미소중력환경(Microgravity environment)을 이용해 매연 입자에 작용하는 열영동 거동의 측정<sup>[7]</sup>이 이루어졌고, 벽면에 부착하는 매연의 거동을 파악한 실험적 연구<sup>[8], [9]</sup>들이 이루어졌다. 특히 Choi et al.<sup>[10]</sup>은 미소중력환경을 이용해 확산화염내 생성되는

매연입자의 벽면으로의 부착거동을 원위치 관찰(In-situ observation)로 그 현상을 파악하였다. 그러나 이러한 실험들은 미소중력환경이라는 실험적 여건의 제한으로 인해 1100 K 이상의 고온의 조건에서는 실험이 이루어지지 않았다. 특히 매연의 축적과 거동에 결정적인 역할을 하는 벽면온도 및 주위공기의 온도가 고온일 때의 실험은 실행되지 않았다. 실제 보일러 및 화학프로세스 등의 실제 열교환기에 적용될 수 있기 위해서는 고온조건에서의 데이터가 필요할 것이다.

이에 본 연구에서는 저자들에게 의해 이루어진 실험 결과<sup>[10], [11]</sup>를 토대로 실험에서는 이루어지지 않은 고온의 주위공기와 벽면 조건에서의 매연 부착 특성을 기존의 수치계산 코드를 이용하여 유동장 및 온도장을 구하여 화염내 매연입자가 고체 벽면으로 부착하는데 어떠한 인자가 지배적인 영향을 주는지를 고찰했다. 또한 주위공기온도와 고체벽면 온도의 상관관계도 조사하였다. 더욱이 본 연구에서는 Soot Deposition Length( $L_{soot}$ )라는 물리값을 제안하여 이 값에 따른 매연의 부착특성을 조사하였다.

## 2. 계산 방법

계산 수행에는 미국의 NIST (National Institute of Standard and Technology)에서 제공하는 수치코드 FDS (Fire Dynamic Simulator Version 4.07)<sup>[12]</sup>을 이용하였다. 계산은 2차원의 연속방정식, 운동량 보존방정식, 화학종 보존방정식, 에너지 보존방정식을 원통좌표계에 의해 해석하였다. 연료는 에틸렌( $C_2H_4$ )을 이용하였으며, 주위 산소 농도는 35% 이다. 화학반응은 연료와 산소의 1차 총체반응으로 고려하고, Direct Numerical Simulation (DNS)에 의해 계산하였다. 또한 본 연구에서 수치 계산을 위해 사용된 FDS에서는 DNS에 의한 계산을 수행할 경우 점성계수, 열전도계수 및 확산 등에 대해서는 운동학론(kinetic theory)에 의해 평가된다. 한편 FDS 계산에 관한 상세한 설명은 User's Guide<sup>[13]</sup> 및 Technical Reference Guide<sup>[14]</sup>을 각각 참조 바란다.

Fig. 1은 계산 영역을 나타낸다. 버너의 축방향을  $z$  좌표, 그것과 직교하는 좌표를  $x$  좌표로 하였다. 계산 영역은 주위 공기 온도<sup>(10)</sup>와 버너 벽면 온도<sup>(11)</sup>에 따른 실험에서 사용된 연소실의 조건과 동일하게 하기 위하여  $z$  방향 165 mm,  $x$  방향 55 mm로 하였다. 격자 간격은 각각  $z$  방향 1.02 mm,  $x$ 방향 0.8 mm이다. 또한 실험과 같은 조건을 가정하기 위해 계산영역에서 아래쪽의 15mm 반경을 벽면으로 가정하고 그 벽면의 상류측에서  $z = 20 \text{ mm} \sim 40 \text{ mm}$ 의 범위에서 연료가 일정하게 흘러나오게 하였다. 고체벽( $x=0$ )에서의 온도경계조건은 등온조건, 속도 경계조건은  $u=0, v=0$ 으로 가정하였다. 그리고 화염 선단 부근을 기준으로 매연의 부착특성에 관하여 논하므로 연료분출구의 상류 끝단(계산 영역의 상류측에서 20mm의 위치)을  $z = 0$ 의 위치로 표기하는 것으로 한다. 계산 조건은 상류측에서의 산소 농도 35%의 공기가 유속 5 cm/s(reduced to ordinal temperature) 유입되고, 연료분출속도는 0.8cm/s이다. 벽면온도는 연료분출구에서 하류부분에  $T_w = 300\text{K}, 600\text{K}, 1200\text{K}$ 로 설정하였고, 주위 공기 온도는  $T_a = 300\text{K}, 600\text{K}, 900\text{K}, 1200\text{K}$ 로 설정하였다. 열영동속도의 계산에 있어서는 계산의 기본방정식에 포함시키지 않고 먼저 기본방정식에 의해 계산된 온도와 속도분포를 바탕으로 별도로 열영동속도를 계산하여 그 영향을 조사하였다.

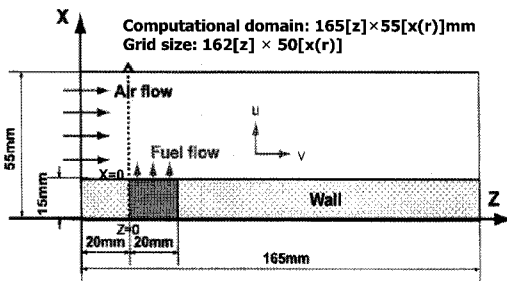


Fig. 1 Schematic description of computational domain

### 3. 계산 결과

#### 3.1 벽면온도의 영향

Fig. 2는  $z = 90\text{mm}$ 에서 벽면온도에 따른 온도

구배 분포를 나타낸다. 그림에서  $T_w=300\text{K}$  일 때의 온도구배는 약 120 K/mm로 큰 값을 가지고 있는 반면  $T_w=1200\text{K}$ 는 높은 벽면온도로 인해 약 -20 K/mm의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이것은 벽면온도가 작을수록 더 큰 열영동효과에 의해 영향을 받는다는 것을 의미하며,  $T_w=1200\text{K}$  일 때 매연입자는 벽면에 부착하지 않는다는 것을 나타낸다. 그리고 버너 벽면에서 5mm이내의 (a) 영역에서는 벽면온도에 따라 값이 크게 변하는 반면, 벽면에서 15 mm 부근의 화염근방에서는 온도구배의 큰 변화를 볼 수 없다. 따라서 벽면 온도의 변화에 의한 온도구배를 구동력으로 하는 열영동력이 버너 벽면 근방 영역에서 매연입자의 거동에 크게 영향을 미칠 것이라 예상된다. 그리고 이 영역에서의 온도장 및 온도구배장은 화염반응대에서의 발열에 의존한다. 즉 벽면온도가 화염반응대에서의 화염온도에 미치는 영향은 적을 것으로 추측된다.

그리고 본 연구에서는 이전 연구<sup>(10), (15)</sup>에서와 동일하게 자유분자 흐름영역에 대한 예측식인 식 (1)의 Waldmann 방정식을 이용하여 화염중에서의 열영동 속도를 구해, 1차 입자인 경우의 매연에 작용하는 힘에 대해서 조사하였다.

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

상식에서  $\nu$ 는 동점성계수,  $\nabla T$ 는 온도구배,  $T$ 는 온도, 그리고  $\alpha_m$ 은 적응계수이며, 본 연구에서는 1로 하였다<sup>(16,17)</sup>.

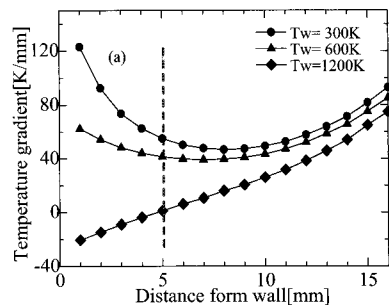


Fig. 2 Temperature gradients at  $z=90\text{mm}$  with different wall temperatures

Fig. 3은 벽면온도가 300 K와 주위공기온도가 300K 일 때  $z=90$  mm 위치에서의 열영동속도( $U_t$ ), 가스 속도( $U_g$ ), 그리고 입자 속도 ( $U_p=U_g+U_t$ )를 나타낸 것이다. 모든 벽면온도의 조건에서 동일한 경향을 보이므로 여기서는 대표적으로 하나의 경우에서만 나타낸다. 본 결과에서 열영동속도  $U_t$ 는 자유분자의 흐름영역에서의 예측식인 식(1)의 Waldmann식을 이용해 구하였다. 화염면에서 바깥쪽 공기측 (air side)의 가스 속도( $U_g$ ) 및 입자 속도 ( $U_p=U_g+U_t$ )를 살펴보면 부(負)의 속도를 나타내고 있다. 이것은 상류에서 하류로 흐르는 가스가 화염면 근처에서 화염면과 가스의 큰 온도차에 의해서 팽창하고, 팽창된 가스는 상부벽에 충돌해 가스의 속도는 다시 부(負)가 되어 하류측으로 흐르기 때문인데 이로 인해 화염 하류의 edge가 하향(下向)이 된다.

화염면에서 연료측(fuel side) 영역에서의 화염면 근방에서는 팽창되는 가스속도와 열영동속도의 상호작용에 의해 매연입자가 이동되지만, 벽면 근방에서 가스속도가 거의 0이며, 입자속도  $U_p$ 는 약  $-0.13$  m/s인데 이것은 열영동속도  $U_t$ 에 의해 거의 결정됨을 알 수 있다. 이 결과로부터 체적 팽창에 의한 가스속도도 어느 정도 매연의 벽면으로의 움직임에 영향을 미치나, 벽면 근방에서는 온도 구

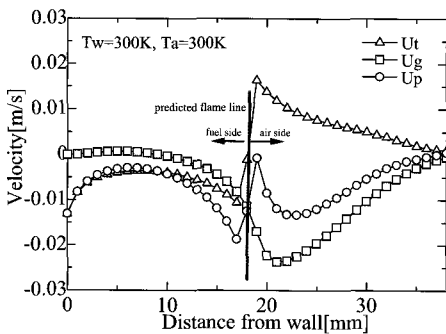


Fig. 3 Relation of thermophoretic velocity ( $U_t$ ), gas velocity ( $U_g$ ), particle velocity ( $U_p$ ) at  $z=90$ mm

배에 의한 열영동속도가 입자의 움직임에 지배적인 영향을 미치고 있음을 의미한다.

여기서 매연 입자가 벽면으로 부착하는 물리과정을 고찰하기로 한다. 매연입자가 일정거리를 가진

벽면에부착하기 위해서는 연소가스가 벽면근방을 통과하기 전에 가스내의 입자가 벽면에 도달할 필요가 있다. 그래서 본 연구에서는 이와 같은 특성을 평가하는 값으로 매연부착특성거리( $L_{soot}$ )를 도입하다.

매연부착특성거리( $L_{soot}$ )는 다음과 같이 정의된다.

$$L_{soot} = -U_p \times \tau_{soot} \tag{2}$$

$$\tau_{soot} = L_c / |V_p| \tag{3}$$

여기서,  $L_c$ 는 특성길이(본 연구에서는 버너부분에서 계산영역후단까지의 거리인 145 mm를 이용),  $V_p$ 는 입자의 위치에서  $z$  방향 속도이며  $U_p$ 는 열영동속도  $U_t$ 와 가스의 대류속도  $U_g$ 를 합한 값이다.  $\tau_{soot}$ 는 매연의 체류시간을 의미한다. 매연입자의 벽면에 대한 체류 시간 ( $\tau_{soot}$ )의 물리적 의미는 매연입자가 특성벽면길이인 145mm의 벽면을 이동하는 동안에 걸리는 시간이다. 즉,  $z$  방향의  $v$  속도가 낮은 벽면 근방에서는 큰 체류시간을 가지게 된다. 그에 반해 화염대 근방에서의 체류시간은 짧다. 매연부착특성거리( $L_{soot}$ )의 물리적인 의미는 매연입자가 벽면에 체류하는 시간내에 버너 벽면방향으로 이동할 수 있는 거리이다. 즉, 매연입자의 버너벽면에 대한 이동거리 및 벽면으로의 부착량을 결정하는 값이다.

Fig. 4는 각 벽면온도에 따라  $z = 90$ mm에서 구한 매연부착거리( $L_{soot}$ )를 나타낸다. 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 계산하였다. Fig. 4(a)는 열영동속도를 고려하지 않은 경우이고, Fig. 4(b)는 열영동속도를 고려했을 때의 결과이다. 결과를 살펴보면, Fig. 4(a)와 같이 열영동력을 고려하지 않은 경우에는 매연입자는 벽면근방까지 이동은 가능하나 벽면에 부착하지는 않는다. 즉 매연입자는 벽면을 이동하는 동안 충분한 체류시간을 가지지만 벽면으로 향하는 속도가 적어 부착할 수 없다는 것을 의미한다. 이에 반해 열영동 속도를 고려한 경우에는 벽면근방에서의 충분한 체류시간과 벽면방향으로의 가스의 흐름에 의해 매연입자는 벽면에 부착하게 된다. 즉, 벽면온도에 따라 벽면에 부착하는 매연입자의 부착량도 큰 차이가 있을 것으로 예상

된다. 또한 Fig. 4(b)에서  $T_w = 300\text{ K}$ ,  $600\text{ K}$ 인 경우  $L_{soot}$  는 벽면 가까이에서 극히 크고 벽면에서 멀어질수록 그 값은 상대적으로 작아진다. 이것은 닥트 중앙부에서는 가스의 팽창효과에 의해 대류속도가 상대적으로 크기 때문에 축방향속도도 증가해 결과적으로  $L_{soot}$  는 작아진다. 한편 벽면 근방에서는 축방향속도가 작아져 상대적으로 벽면으로 향하는 힘이 매연입자의 움직임에 지배적인 영향을 미친다. 그 결과 벽면근방의  $L_{soot}$  가 큰 값을 가지게 된다. 그런데 벽면근방에서는 가스의 흐름이 극히 낮은 유속을 가지기 때문에 대류에 의한 x 방향속도는 존재하지 않고 대부분이 열영동속도에 의한 것이다. 이 결과로부터 벽면 아주 가까운 영역 ( $x=3\text{ mm}$  이내)에서는 열영동력이 매연입자의 부착에 결정적인 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

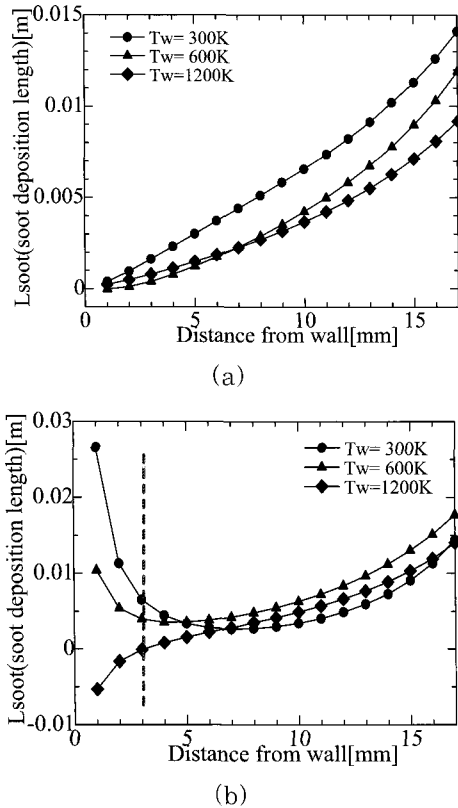


Fig. 4 Soot Deposition length distribution (a) without considering thermophoretic velocity and (b) with considering thermophoretic velocity for various wall temperatures at  $z=90\text{ mm}$

### 3.2 주위공기온도의 영향

실험에서는<sup>(10)</sup> 미소중력환경이라는 제한된 여건으로 인해 주위공기온도가  $900\text{ K}$ ,  $1200\text{ K}$ 에 대해서는 실시하지 않았지만 고온공기 연소는 일반적으로  $1100\text{ K}$  이상에서의 주위 가스 중에서의 연소이므로 그 온도에서의 고찰이 바람직하다.

Fig. 5는  $z = 90\text{ mm}$ 에서 벽면온도가  $800\text{ K}$ 일 때 각 주위공기온도에 따른 온도분포를 나타낸다. 여기서 벽면온도를  $800\text{ K}$ 로 한 것은 실제 열교환기 및 보일러 등의 전열관 벽면온도를 고려하기 위해서다. 주위공기온도가 증가함에 따라 화염온도가 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 벽면에서 약  $18\text{ mm}$  인 화염근방에서의 온도차는 크나 벽면근방에서는 그 차이가 적음을 알 수 있다. 즉 주위공기온도에 따른 벽면 근방에서의 열영동력 차이는 그다지 크지 않을 것으로 생각한다.

Fig. 6은  $z = 90\text{ mm}$ 에서 벽면온도가  $800\text{ K}$ 일 때 각 주위공기온도에 따른 속도분포를 나타낸다.

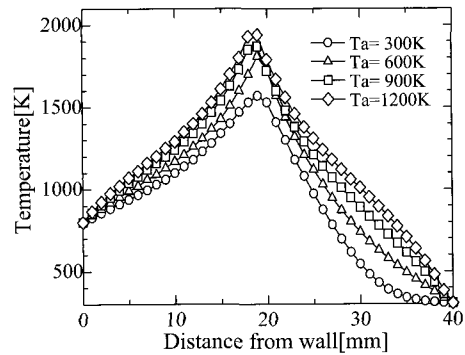


Fig. 5 Temperature distributions at  $z=90\text{ mm}$

Fig. 6(a)는 x방향의 반경방향속도(u-velocity)이며, Fig. 6(b)는 z방향의 축방향속도(v-velocity)를 나타낸다. Fig. 6(a)를 보면  $T_a=300\text{ K}$ 일 때만 벽면방향으로 속도가 크고 그 이상의 온도에서는 거의 같은 경향을 나타내고 있다. 그리고  $T_a=300\text{ K}$ 일 때 벽면에서 약  $8\text{ mm}$  지점까지 u-velocity 값이 0보다 약간 큰 값을 나타내고 있는데, 이것은  $800\text{ K}$ 라는 높은 벽면 온도의 설정으로  $T_a=300\text{ K}$ 일 때  $z=90\text{ mm}$ 에서 벽면 근방에서 벽면온도가 주위온도보다 높아 반경방향의 u-velocity

가 '0'보다 다소 큰 값을 가지게 된다. Fig. 6(b)의 결과를 살펴보면, 주위공기온도의 증가와 더불어 v-velocity 값도 증가하고 있음을 알 수 있다. 이 v-velocity 값은 화염선단에서의 발열량에 의해 영향을 받으므로 주위공기온도가 증가할수록 산화제가 반응대로의 확산속도가 빨라져 증가될 것으로 생각된다.

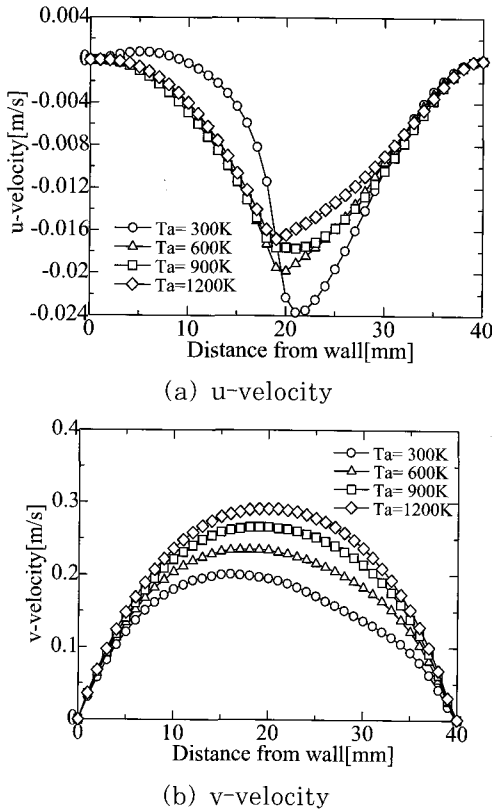


Fig. 6 Distributions of (a) u-velocity and (b) v-velocity at  $z=90\text{mm}$

Fig. 7은  $z = 90\text{mm}$ 에서 벽면온도가  $800\text{K}$ 일 때 각 주위공기온도에 따른 매연부착특성거리( $L_{soot}$ )를 나타낸다. 먼저, 벽면에서  $15\text{mm}$  전후의 반응대 영역에서는  $T_a=300\text{K}$ 를 제외한 나머지 주위공기온도의 경우 주위공기온도가 증가함에 따라 벽면 방향으로 매연입자는 부착하기 어려운 경향을 나타낸다. 그러나 버너 벽면 근방에서는 주위공기온도의 상승과 함께 매연입자는 버너 벽면방향으로 이

동하기 쉽다. 또한  $L_{soot}$ 의 값은 벽면온도에 따른 차이보다 그렇게 큰 차이를 나타내지 않으나, 주위공기온도의 상승으로 인한 가스의 체적팽창으로 인해 화염은 주위공기온도의 증가와 더불어 벽면으로 이동하게 되어 벽면으로의 매연 부착량은 증가할 것으로 예상된다. 이 결과로부터 주위 가스 온도가 상승함에 따라 매연입자가 버너 벽면으로의 부착량이 증가한다는 실험결과와 잘 일치한다<sup>[10]</sup>.

마지막으로 주위공기온도와 벽면온도의 상호관계에 대해서 검토한다.

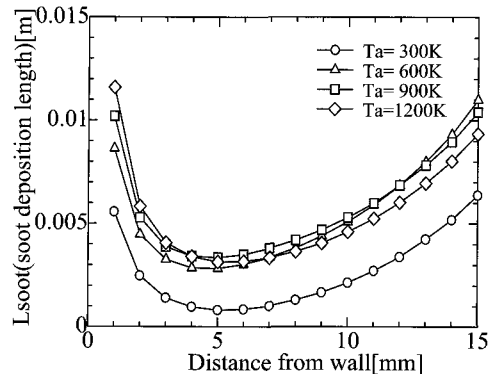


Fig. 7 Soot Deposition length distribution with different surrounding air temperatures at  $z=90\text{mm}$

Fig. 8은 주위공기온도가  $300\text{K}$ ,  $900\text{K}$ 에서의 벽면 온도가  $300\text{K}$ ,  $600\text{K}$ ,  $1200\text{K}$  일 때의 매연부착특성거리( $L_{soot}$ )를 나타낸다. Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 주위공기온도에 관계없이 벽면온도가 증가할수록  $L_{soot}$ 값은 감소하는 것을 알 수 있다. 특히,  $T_w = 1200\text{K}$ 에서는  $T_a = 300\text{K}$ ,  $900\text{K}$  두 경우 모두에서 벽면에 부착하지 않는 결과를 보이고 있다. 또한 화염대 근방인  $15\text{mm}$  지점에서는 주위공기온도가 증가함에 따라 가스의 체적팽창에 따른  $z$  방향의 축방향속도도 증가하여 화염내 매연입자 체류시간의 감소로 인해  $L_{soot}$ 값이 감소하여 매연입자가 버너 벽면 방향으로 이동하기 힘든 반면, 벽면근방에서는 주위공기온도가 증가함에 따라  $L_{soot}$  값은 증가하여 버너 벽면 방향으로 이동하기 쉬운 것을 알 수 있다.

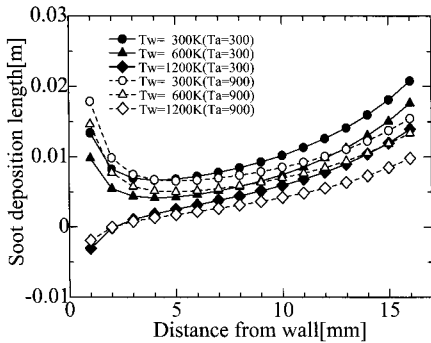


Fig. 8 Soot Deposition length distribution for various wall temperatures and surrounding air temperatures at  $z=90\text{mm}$

#### 4. 결 론

벽면온도와 주위공기온도의 변화에 따른 화염중의 매연입자의 거동 및 벽면으로의 부착 메커니즘을 파악하기 위해 수치해석을 행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 수치해석결과 주위공기온도가 높을수록, 벽면온도가 낮을수록  $L_{soot}$ 의 값은 증가해 매연입자는 벽면근방에서 벽면에 부착하기 쉽다는 것을 알 수 있었다. 특히 벽면온도가  $T_w = 1200\text{ K}$ 일 때는 본 연구에서 대상으로 한 주위공기온도에 관계없이  $L_{soot}$ 는 부(負)의 값을 가져 벽면으로의 부착이 이루어지지 않을 것으로 예상됐다. 이러한 수치해석 결과들은 이전 실험 결과와 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

(2) 화염면 근방에서는 매연입자가 벽면방향으로 이동할 때 화염에서의 높은 온도로 인한 가스팽창에 의해 발생하는 벽면방향으로의 대류속도도 어느 정도 역할을 하지만, 매연입자가 부착하는데 지배적인 영향을 미치는 벽면 근방에서는 작은 값이지만 열영동속도에 의해 대부분의 매연 입자가 부착한다는 것을 알 수 있었다. 이것은 벽면근방에서의 매연 부착현상을 파악하기 위해서는 열영동속도의 고려는 필수적이라는 것을 의미한다.

(3) 축방향의 대류속도가 작은 벽면근방에서는

작은 열영동속도의 변화에도 매연입자의 부착 특성은 크게 변한다. 이러한 점을 명확히 평가하기 위해 Soot Deposition Length (매연부착거리)를 도입을 제안하였으며 이 값을 기준으로 매연의 부착 특성 차이를 이해할 수 있다는 것을 나타냈다.

#### 후 기

이 논문은 2007년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

#### 참고문헌

- [1] A. G. Gaydon and H. G. Wolfhard, "Flames Their Structure Radiation and Temperature", Chapman & Hall, London, pp. 175, 1970.
- [2] A. Gomez and D. E. Rosner, "Thermophoretic effects on particles in counter-flow laminar diffusion flames", combust. Sci. and Tech. 89, pp. 335-362, 1993.
- [3] C. J. Sun, C. K. Law and R. L. Axelbaum, "Thermophoretic effects on seeding particles in LDV measurements of strained flames", combust. flame, 105, pp.189-201, 1994.
- [4] P. Adomeit, and U. Renz, "Deposition of Fine Particles from a Turbulent Liquid Flow: Experiments and Numerical Predictions", Chemical Engineering Science. Vol.51, No.13 (1996), p.3491-3503
- [5] R Tsai, and L. J. Liang, "Correlation for Thermophoretic Deposition of Aerosol Particles onto Cold Plate", J. Aerosol Sci., 32 (2001), p.473-487.
- [6] D. G. Thakurta, M. Chen, J. B. Mclaughlin, and K. Kontomaris, "Thermophoretic Deposition of Samll

- Particles in a Direct Numerical Simulation of turbulent Channel Flow", Int. J. Heat and Mass transfer 41 (1998), p.4167-4182
- [7] H. Ono, R. Dobashi, and T. Sakuraya, "Thermophoretic velocity measurement of soot particles under a microgravity condition", Proc. Combustion Institute, Vol. 29, (2002), 2375-2382
- [8] M. S. Joanne, W. Alan, and H. Douglas. "Soot and carbon Deposition Mechanisms in ethane/air flames", Fuel Vol. 74 No. 12 (1995), p.1753-1761
- [9] T. Pushkar, P. T. James, F. Xiaodong, R. Amy. "Estimation of Particle Volume Fraction, Mass fraction and Number density in Thermophoretic deposition systems", J. Heat and Mass Transfer 46 (2003), p.3201-3209
- [10] 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", JSME Inter. vol.49 No.1 pp. 167-175, 2006.
- [11] 최재혁, 후지타오사무, "미소중력환경을 이용한 벽면근방 확산화염내 매연부착거동의 위치 관찰," 한국마린엔지니어링학회지, 제 29권, 제 8호, pp. 907-914, 2005.
- [12] <http://fire.nist.gov/fds>
- [13] Kevin B. McGrattan, Glenn P. Forney, NIST Special Publication 1019, 2006, Ed., Fire Dynamics Simulator (Version 4) - User's Guide.
- [14] Kevin B. Mc Grattan, NIST Special Publication 1018, 2006 Ed. Fire Dynamics Simulator (Version 4) - Technical Reference Guide.
- [15] 최재혁, 이기영, 윤두호, 윤석훈, 최현규, 최순호, "고체의 벽면온도에 따른 고온가스 내의 입자거동에 대한 실험 및 수치해석 연구, 한국마린엔지니어링학회지, 제 30권, 제 3호, pp. 403-412, 2006.
- [16] L. Waldmann, "On the Motion of Spherical Particles in Nonhomogeneous gases", Academic Press Inc., (1961), p.323-344.
- [17] 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.

## 저 자 소 개



### 최재혁(崔宰赫)

1974년 3월생, 1996년 한국해양대학교 기관공학과 졸업(학사), 2000년 동대학교 대학원 졸업(석사), 2005년 일본북해도 대학 대학원 졸업(박사), 2005년~2007년 1월 한국원자력연구원 박사후연수생, 2007년 2월~현재 서울대학교 기계항공공학부 BK 조교수, 2006년 7월(사)한국마린 엔지니어링학회 논문상(장려상), 2007년 4월 일본기계학회 우수논문상



### 한원희(韓元熙)

1968년생, 1991년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1999년 목포해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(공학석사), 2002년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(공학박사), 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 조교수



### 윤두호(尹斗好)

1956년 1월 15일생, 1991년 부경대학교 졸업(공학사), 1994년 한국해양대학교 대학원 석사과정수로(공학석사), 2001년 한국해양대학교 대학원 박사과정수로(공학박사), 1996년~현재 한국폴리텍Ⅷ대학 기계설계과 교수.





**윤석훈 (尹錫勳)**

1954년 8월생, 1977년 한국해양대학교 기관학과(공학사), 1984년 인하대학교대학원 기계공학과(공학석사), 1992년 한국해양대학교대학원 선박기계공학과(공학박사), 2002년~2004년 University of Florida (U.S.A.) Courtesy Professor, 1993~현재 한국해양대학교 기관시스템 공학부 교수



**정석호 (鄭石浩)**

1954년생, 1976년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1980년 Northwestern University 기계공학과 석사 1983년 Northwestern University 기계공학과 박사 1984.1~현재 : 서울대학교 기계항공공학부 교수