

미소중력 환경내의 벽면 근방 확산 화염 특성에 관한 수치 해석

최재혁† · 후지타 오사무*

(원고접수일 : 2005년 9월 1일, 심사완료일 : 2005년 11월 8일)

Numerical Simulation on Characteristics of Laminar Diffusion Flame Placed Near Wall in Microgravity Environment

Jae-Hyuk Choi† · Osamu Fujita*

Abstract : Characteristics of a laminar diffusion flame placed near wall in microgravity have been numerically analyzed in a two-dimension. The fuel for the flame is C_2H_4 . The flame is initiated by imposing a high temperature ignition source. The flow field, temperature field, and flame shape in microgravity diffusion flame are detailed. Especially, effects of surrounding air velocity and fuel injection velocity on the microgravity diffusion flame have been discussed accounting for standoff distance. And, the effect of curvature rate has been also studied. The results showed that velocities in a diffusion flame were overshoot because of volumetric expansion and distribution of temperature showed regularity by free-buoyancy. This means that the diffusion flame in microgravity is very stable, while the flame in normal gravity is not regular and unstable due to buoyancy. Standoff distance decreases with increase in surrounding air velocity and with decrease in fuel injection velocity. With increasing curvature rate, the position of reaction rate moves away the wall.

Key words : Diffusion flame(확산 화염), Surrounding air (주위 공기), Standoff distance(이격거리), Microgravity(미소 중력), Reaction rate(반응율)

기호설명

N_2 : z-방향 그리드 수

p : 압력, [Pa]

R_u : 일반기체상수, [J/mol · K]

t : 시간, [s]

T : 온도, [K]

A : 빈도인자, [$cm^3/g \cdot s$]

c_p : 정압비열, [J/g · K]

D_i : 화학종 i 의 확산계수, [cm^2/s]

E : 활성화 에너지, [J/mol]

h_i : 화학종 i 의 형성엔탈피, [J/mol · K]

† 책임저자(한국원자력연구소 원자력수소 사업추진반), E-mail : jhhair@hanmail.net, Tel : 042)868-2066

* 일본 북해도대학 기계우주전공분야

- N_i : r-방향 그리드 수
- T_{ign} : 착화 온도, [K]
- u : r-방향 속도, [cm/s]
- v : z-방향 속도, [cm/s]
- v_{min} : 화염선단의 y-방향 속도, [cm/s]
- u : 속도벡터, [cm/s]
- ω_i : i 화학종의 생성율, [J/g]
- ω_T : 에너지 방정식의 생성율, [J/g]
- W_i : i 화학종의 분자량, [g/mol]
- Y_i : i 화학종의 질량분율
- U_f : 연료분출속도, [cm/s]
- V_a : 주위 공기 속도, [cm/s]
- T_w : 벽면 온도, [K]
- T_a : 주위 공기 온도, [K]
- O_2 : 산소 농도, [%]
- V_M : 최대 반응율에서의 속도, [cm/s]
- δ : 이격거리, [cm]

1. 서 론

벽면 근방 확산 화염은 경계층형 확산 화염의 일종이다. 경계층형 확산 화염은 고체 혹은 액체의 가연성 물질 표면에서의 연소를 명확히 알기 위한 기초 연구로 널리 이용되며, 기체 연료를 다공질 벽면으로부터 분출시켜 벽면을 따라 흐르는 흐름의 층류 경계층에 형성되는 확산 화염으로 지금까지 많은 연구자에 의해 연구되고 있다⁽¹⁻¹²⁾. Hirano 등⁽²⁾은 수평 공기흐름 중에 벽면으로부터 연료를 분출시켰을 때 형성되는 경계층 확산 화염 경우, 화염 전방 선단(flame edge) 직후의 영역에 형성되고 경계층내의 유속이 주류 속도보다 빨라지는 이른바 속도의 오버 슈트(overshoot) 이 존재한다는 것을 실험으로 증명하였으며, 그 원인으로서는 화염 형상에 의해 경계층내에 발생하는 국소 압력 변화가 중요 원인이라 하였다. Ramachandra 등⁽⁷⁾은 평판상 확산 화염의 소염 한계나 화염에 대한 부력의 영향을 조사하였다. 植田利久 등⁽⁹⁾은 화염내 흐름장의 상세한 측정을 통하여, 화염의 구조와 기본적인 특성을 명확히 하였다. 그러나 이러한 연구들

은 대부분 정상상태에서의 현상에 관한 실험적 연구이며, 비정상인 연소 과정에 대한 연구는 그다지 이루어지지 않았다. 최근 경계층 층류 화염의 비정상 거동에 관한 기초적인 연구가 체계적으로 이루어져 화염의 비정상인 거동에 대한 다양한 의견이 나오고 있으나⁽¹⁰⁻¹²⁾, 이들 연구의 대부분은 화염의 1차원적인 변동 또는 평면상 화염의 변동 현상 등에 한정되어 있어 2차원이나 3차원적인 거동에 대해서는 불명확한 점이 많다. 더욱이 수치해석에 사용된 좌표계는 2차 평면 좌표계에 의한 연구가 대부분이다. 그러나, 본 저자들이 대상⁽¹³⁾으로 한 벽면근방 확산 화염내 매연입자의 거동 및 부착에 관한 특성을 파악할 경우, 매연입자의 움직임을 조사하기 위해서는 정상상태 및 평면 좌표계의 조건에서는 매연입자의 움직임에 대한 현상을 정확히 파악하는 것이 어렵다. 또, Fig.1에 나타난 바와 같이 평면상의 버너를 이용하여 매연입자의 부착 현상을 조사할 경우 현상의 완전한 축대칭이 이루어지지 않음은 물론 버너 가장자리의 영향으로 인해 매연입자의 부착위치가 불명확하여 벽면으로의 매연 입자 거동 및 부착현상을 파악하기에 부적합한 부분이 존재한다. 따라서 벽면 근방 확산 화염내에서 벽면으로의 매연입자 부착거동을 조사할 때에는 원통버너가 유효하다는 것이 본 저자들의 연구를 통해 알 수 있었다⁽¹³⁾. 원통버너를 이용함으로써 평면 버너의 가장자리 영향을 없애고 완전한 축대칭 화염을 형성시켜 좋은 실험결과를 얻을 수 있었으며, 2차원 수치 해석만으로도 실험결과와 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

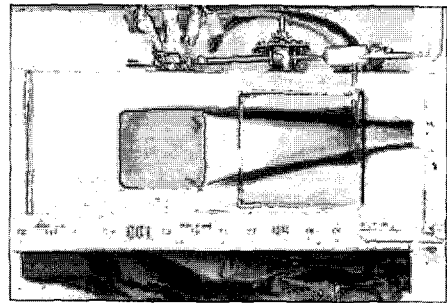


Fig. 1 Soot deposition on wall in boundary laminar diffusion flame in microgravity

따라서 본 연구에서는 지금까지 연구되지 않은 특수 환경인 미소 중력 환경에서의 벽면 근방 확산 화염을 대상으로 2차원 원통 좌표계를 이용해 수치 계산을 하여, 화염내 유동장 및 온도장의 특성을 파악하고, 주위 속도와 연료 분출 속도에 따른 standoff distance 를 산출하여 확산 화염의 안정성에 기여하는 화염 선단의 특성에 대하여 알아보고, 화염내 매연입자가 벽면에 부착하기 쉬운 조건에 대해서도 설명하였다. 특히 버너 반경에 따른 반응을 분포의 변화와 화염 현상의 차이에 대해서도 검토하였다.

2. 수치 해석

2.1 기초방정식

본 연구에서는 미소 중력 환경하에서의 벽면 근방에 존재하는 직교류 확산 화염중의 전반적인 특성에 대하여 수치계산을 통해 상세하게 검토한다. 먼저 이 현상을 해석하기 위한 모델 및 간략화 된 기초 방정식에 대해서 설명하고, 본 저자들에 의해 발표된 실험결과와 비교하여 본 수치계산의 타당성에 대해서도 살펴본다.

Fig. 2는 계산 모델 개략도를 나타낸다. 실제의 연소실 형상을 고려하여^[13], 실험과 거의 동일한 55×150mm의 영역에 대해서 계산했다. 예를 들면 버너 벽면으로부터 연소실 최상측 벽면까지의 거리는 40mm이다. 만약 이 높이가 변화한다면 이로 인해 화염의 형상 및 특성은 완전히 변화할 것이다. 따라서 계산 영역을 실제 연소실과 같은 조건으로 설정함으로써 화염의 형상 및 특성이 동일하다는 전제하에 논의한다. 버너 반경은 실제의 원통 버너와 같은 반경 15mm로서 버너꼭줄에 관해서도 실험과 같은 조건으로 했다. 좌표 원점은 z 축상에서, 버너의 앞쪽 가장자리로부터 14mm의 위치로 했다. 본 연구에 대한 해석에는 원통 좌표계를 이용하여 반경 방향 및 축방향을 각각 r 및 z 로 했다. 격자수는 128(r)×512(z)이며, 균일 간격이다.

Soret-Dufour 효과, 복사열손실, 부력효과와 압력구배에 의한 확산효과는 무시한다.

화학반응은 1차 총괄 반응이며 낮은 마하수 가정 (low Mach number approximation)을 적용하였다.

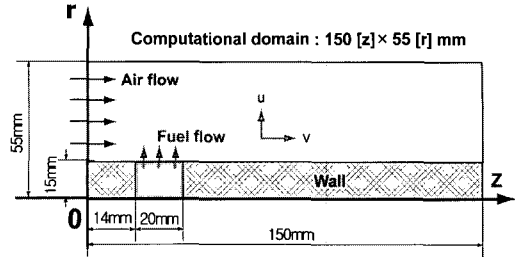


Fig. 2 Schematic diagram of computational domain

반응성 가스 역학 기초 방정식은 다음에 나타낸 바와 같이 질량, 운동량, 에너지, 화학종 성분 및 기체 상태 방정식이며^[14] 반응속도정수는 Arrhenius 형 반응식을 이용하여 계산하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p^{(1)} - \nabla \cdot \mathbf{T} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \frac{1}{\rho c_p} \left(\nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \sum_i h_i \omega_i \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) + \omega_i, (i=1, \dots, N-1) \quad (4)$$

$$p^0 = \rho T \left(\sum_i Y_i / W_i \right) / (1 / W_i) \quad (5)$$

$$\omega = A (\rho Y_f) (\rho Y_o) \exp \left(- \frac{E}{R_u T} \right) \quad (6)$$

A는 빈도인자로 각 연구자에 따라 인자값의 정의가 다르지만 본 연구에서는 적절한 반응이 일어나도록 하기 위해 빈도인자 $A = 2.1 \times 10^{12} \text{cm}^3 / (\text{g} \cdot \text{s})$ 를 적용하였고, 활성화 에너지 E는 Westbrook^[15]의 에틸렌(C₂H₄)의 활성화 에너지인 $E = 124.61 \text{kJ/mol}$ 을 적용하였다.

기초 방정식의 차분화는 시간과 공간에 대해서 2차 정도를 적용하였다. 공간 차분화는 중앙 차분법과 staggered grid 기법을 사용하였으며 시간 적분 알고리즘으로는 2차 정도의 예측/복수교정법(predictor-corrector)을 적용하였다^[16]. 또, 속도와 스칼라량을 업데이트 하기 위해서 predictor 단계에서는 2차 정도의 Adams-Bashforth 시간 적분 방법을, corrector 단계에서는 quasi Crank-Nicolson법을 이용하였다. 각 단계에서 속도가 연속 방정식을 채우기 위해서 fractional step 방법을 적용하였다^[17]. 이 fractional step 방법은 운동량 방정식에서 입력항을 분리하여 계산한 후, 중간 단계 속도를 도입하여 연속 방정식을 만족하도록 속도와 압력을 따로 계산하는 방법이다. 그리고 fractional step 을 적용할 때 압력에 대한 poisson식을 풀기 위한 solver가 필요하게 되는데 본 계산에서는 multi-grid solver를 채용하였다^[18].

초기 조건은 화염을 형성시키기 위해서 비반응장의 혼합층에 국부적으로 높은 온도($T_{ign}=1,300K$)를 준 후, 이 해가 실제 화염 전파를 표현할 수 있도록 시간에 의한 온도의 변화가 최소가 될 때까지 계산하였다. 입구 조건은 가상의 셀에 입구 조건을 설정하였다. 연료의 속도는 충분히 발달한 흐름으로 하고, 주위 공기는 균일 속도(uniform velocity)로 하였다. 벽면 조건은 버너 부분을 제외하고 양벽면에는 미끄럼 없음 조건(no-slip condition)을 적용하였다. 출구 조건은 대류 경계 조건(convective boundary condition)을 이용하였다^[19]. 열역학 및 열전달 계수는 Chemkin III 와 transport package를 이용하여 해석하였다^{[20][21]}.

3. 결과 및 분석

사용한 기초 방정식은 식(1)~(6)이다. 계산 조건은 연료 분출 속도 $U_f=0.8$ cm/s, 주위 가스중 산소 농도 $O_2=35\%$, 주위 가스 유속 $V_a=5$ cm/s, 주위 가스 온도 $T_a=300K$, 벽면 온도 $T_w=300K$, 주위 밸런스 가스는 질소이다.

Fig. 3은 계산으로부터 얻은 벽면 근방 확산 화

염의 속도 분포를 나타낸다. 여기에서 화염의 위치는 최대 반응율의 위치로 가정하며, r-방향은 u-속도, z-방향은 v-속도이다. Fig. 3에서 알 수 있듯이, 화염 선단 부근을 통과하는 흐름의 속도는 화염대에 가까워질 수록 화염으로부터 화염 전방으로의 체적 팽창력 때문에 감소하고, 화염대를 통과하면 주류 속도 5cm/s보다 몇 배로 커지는 속도의 오버슈트가 생기는 것을 알 수 있다. 그 z-방향의 속도는 약 36cm/s이며, 이것은 주류 방향의 속도가 발열 반응에 의한 체적 팽창력에 의해서 크게 증가하기 때문이다. 또, 통상의 경계층류의 경우, 상류측 화염 전방으로 박리(순환 영역)가 형성되지만^[21], 본 계산에서는 그러한 현상이 형성되지 않으며, 화염도 벽면에 가까워지고 있다. 그 이유는 유로의 높이가 한정되어 있지 않은 경우에는 z-방향의 높이가 증가 할수록 주류 속도는 거의 변화하지 않는 것에 반해, 유로의 높이가 한정되어 있는 경우에는 주류 속도가 점차 커짐으로써 박리 영역이 생기기 어렵고 화염의 높이도 낮아지기 때문이다. 또, 벽면의 간격이 좁아지면, 화염면에서 u-정방향(positive direction)으로의 체적 팽창이 발생하기 어려워져, 그 결과 체적 팽창은 u-부방향(negative direction) 즉 버너 벽면 방향으로 향하게 된다. 또, v속도 분포에 대해서도 벽면 높이가 낮아짐에 따라 가스의 체적 팽창 공간이 작아지기 때문에 체적 팽창은 큰 폭으로 증가한다. 그리고 화염 선단 전방의 속도가 매우 작아지기 때문에 화염이 부착하기 쉬워짐과 동시에 성분 가스나 발생열의 화염 선단 전방으로의 확산이 촉진된다.

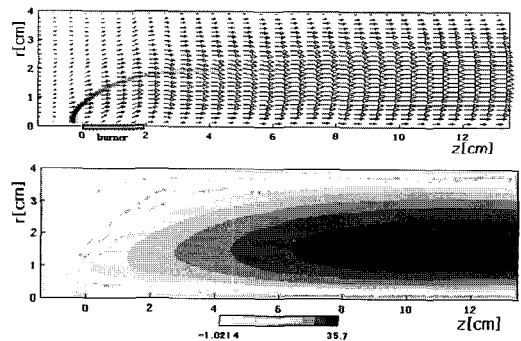


Fig. 3 The vector of velocity and the contour of v-velocity

Fig. 4는 등압선도에 의한 압력 분포를 나타낸다. 화염대 전후로 나타나는 급격한 압력 구배는 그 방향으로의 흐름이 크게 가속되는 요인이 된다. 등압선 형상의 변화로부터 화염 선단의 상류 측에 비교적 높은 압력 부분이 생기고(○부분), 화염대의 하류측에서는 전반적으로 압력 구배가 낮아지는 것을 알 수 있다. 특히, 본 연구에서는 미소 중력환경에서의 계산이므로 자연 대류에 의한 흐름의 혼란이 없기 때문에 일렬로 정렬된 듯한 압력 분포를 나타내고 있다. 화염대의 하류측 압력 분포 양상은 지금까지의 연구 결과^[3,8]들을 비롯해 각 연구 결과들이 조금씩 다른 경향을 나타낸다. 이러한 차이는 흐름의 양상을 큰 폭으로 바꾸는 것은 아니지만 주로 하류측 경계의 위치 및 조건에 의해 생긴 것이라 할 수 있다.

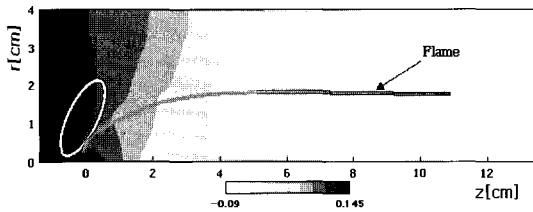


Fig. 4 The contour of pressure

Fig. 5는 온도 분포를 나타낸다. 지구중력환경에서는 자연대류의 영향으로 화염의 tip부분이 가장 높은 온도분포를 나타내지만, 본 연구의 대상인 미소중력환경에서는 부력에 의한 영향이 없어지기 때문에, 주위 공기의 확산에 의한 의존성이 크게 되어, 그림에서 나타낸 것과 같이 화염 선단에서 가장 높은 온도를 나타낸다. 화염 선단 전방에서 온도 상승 영역이 보이는데 이것은 화염 선단 전방과 고체벽으로의 전도 혹은 주위 공기와의 대류에 의해 열이 화염 선단의 상당 상류측까지 이동했기 때문이다. 화염 선단 전방의 고체벽에 전달된 열은 고체 부분을 통해서 상류측에 이동한 후, 반대로 고체벽으로부터 기체측에 전달되고, 화염대의 상류부를 크게 돌면서 이동한다. 여기에서, 상류측의 고체벽 근방의 기체의 온도가 주위 온도보다 상승하고 있는 것을 알 수 있다.

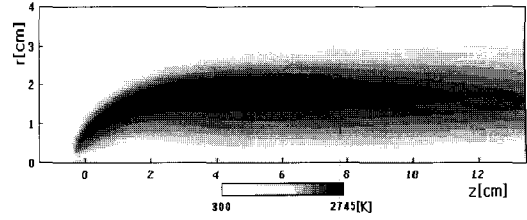


Fig. 5 The contour of temperature

Fig. 6은 반응속도 분포를 나타낸다. 화염 선단에서 반응속도가 매우 큰 영역이 존재하고, 화염 선단으로부터 멀어지면서 점차 작아진다. 화염대 외측의 상당한 영역까지 반응대가 형성되고 화염 선단의 하류측에서는 반응 영역이 하류 방향으로 그 생성열이 화염 후방으로 대류에 의해서 이송되기 때문에 Fig. 5와 같은 온도 분포를 나타낸다. Takahashi^[23]등의 연구에서는 화염 선단에 존재하는 반응속도가 현저하게 큰 값을 나타내는 부분을 반응핵(Reaction Kernel)으로 정의하여, 이 부분에서는 확산 버너 화염 및 경계층 확산 화염의 공통되는 특성을 가지며 이러한 확산 화염의 부착기구 즉 화염 안정성에 중요한 역할을 한다고 했다. 본 연구는 1차 총괄 반응 모델로 단위반응을 고려한 모델과의 결과를 비교하는 것은 어렵지만, 화염대의 총괄적인 구조와 특성에는 큰 차이가 없다. 또한, 화염 선단에서 극소적으로 반응속도가 커짐과 동시에 흐름의 속도가 비교적 작은 상태로 유지되는 기체 역학적인 구조가 기류중의 확산 화염의 안정성을 유지하는 큰 요인이라고 할 수 있다. 화염 선단의 특성을 한층 더 명확하게 하기 위해서 화염 선단의 상황에 주목하였다.

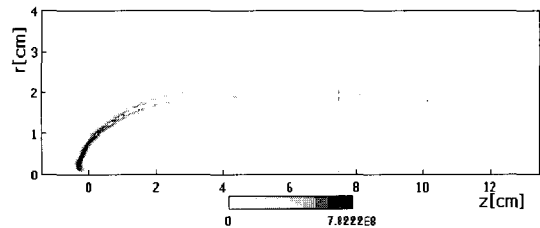


Fig. 6 The contour of reaction rate

Fig. 7은 화염 선단의 상황을 표시하는 대표치와 주위 속도와 연료분출속도에 따른 standoff

distance를 나타낸다. Fig. 7(a)는 그 대표치를 정의하는 그림이며, 그림에서 standoff distance의 산출은 Fig. 7(a)에 나타난 반응속도 분포의 화염 선단 부근을 확대하여 등고선을 그리고, 그 값의 최대치와 1/2되는 곳까지를 거리로 산정하였다. 첨자 M은 반응속도가 최대가 되는 위치에서의 값을 나타낸다.

Fig. 7(b),(c),(d)의 어느 경우에서도 M점은 연료가 분출되는 버너 상류 끝단($z=0$)보다 상류측에 있으며 T_M 는 약 2,750K전후이다. 먼저, Fig. 7(b),(c)를 비교했을 때 주류 속도가 큰 Fig. 7(c)의 경우 최대 반응율에서의 속도 V_M 은 증가하지만 standoff distance δ 는 작아진다. 다음으로 Fig. 7(b),(d)를 비교해 보면 연료 분출 속도가 큰 Fig. 7(d)의 경우에는 δ 는 커지지만, V_M 은 그다지 변하지 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서 이 결과로부터 주류 속도가 빠르고 연료 속도가 작을수록 화염은 벽면에 가까워진다는 것을 알 수 있었다. 이것은 화염중에서 생성되는 매연 입자가 벽면으로 부착하기 쉽다는 것을 의미한다.

Fig. 8은 연료의 농도 분포를 나타낸다. 연료 농도는 버너에서 멀어짐에 따라 작아져 화염 선단을 제외한 화염대 대부분의 농도는 대체로 0.01 이하이다.

화염 선단의 농도는 비교적 크고 0.01-0.1 정도이며 비교적 적은 양이지만 버너의 상류측까지 연료가 확산하고 있는 것을 알 수 있다. 연료의 확산은 혼합기체의 전체적인 흐름의 경로와 달리 버너로부터 분출된 연료는 대류에 의해 하류로 옮겨지면서 화염대로 향해 확산한다. 화염대에서는 농도는 작지만 농도 구배가 비교적 크기 때문에 확산

속도는 대류에 의한 연료의 이동 속도에 의해서 커져, 연료의 확산은 화염대에 대해서 거의 직각이 된다. 또한, 화염 선단과 고체면 사이 즉, standoff distance인 불과 수 mm의 소염부가 있으므로 이 영역을 통하여 일부의 연료는 화염을 통과하지 않고 화염 선단 전방으로 확산한다. 화염 선단 전방의 흐름 속도는 매우 작기 때문에 연료는 고체면을 따라 상류까지 확산한 후 대류에 의해 상류측에서 반응대 부근으로 이동한다. 이 때문에 화염 선단 전방의 비교적 넓은 범위에 걸쳐서 연료가 존재하게 된다.

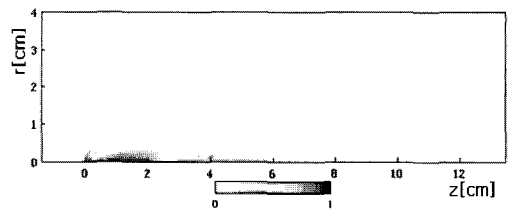


Fig. 8 The mass fraction of fuel(C_2H_4)

Fig. 9는 $z=9cm$ 에 있어서의 각 화학종의 질량분율 및 온도 분포를 나타낸다. 온도가 극대치가 되는 위치는 화염대와 거의 일치하며, 반응생성물 (CO_2 및 H_2O)의 질량 분율이 극대가 되는 위치와도 일치한다.

다음으로 화염의 안정 한계를 조사하기 위해 산소 농도 35%에 대해 연료 분출 속도 U_f 에 의한 화염 형상의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 등고선은 반응율을 나타낸다. Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)를 비교하였을 때, Fig. 10(b)의 경우 U_f 가 극히 작음에도 불구하고, 화염이 짧아질 뿐, 화염 선단

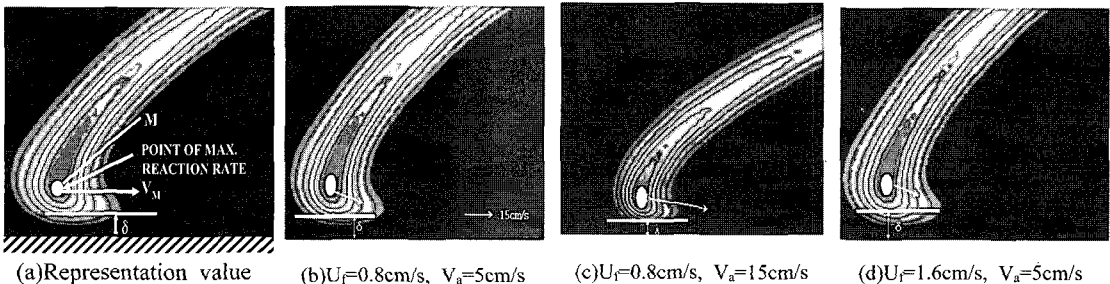


Fig. 7 Flame feature according to fuel injection velocity and air velocity

의 형상은 변화가 없다. 또한 소염과 같은 현상도 발생하지 않았다. 이것은 본 계산의 조건이 다소 높은 산소 농도이므로, 충분히 높은 온도를 유지하여 소염영역이 생기지 않기 때문이다.

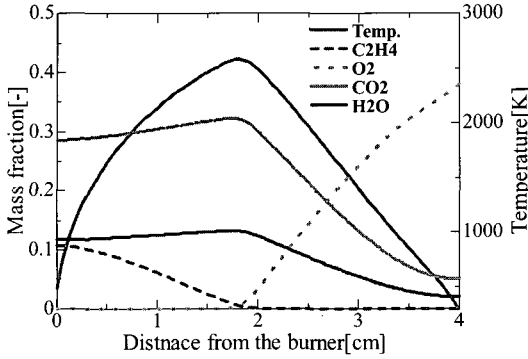


Fig. 9 The distribution of species and temperature

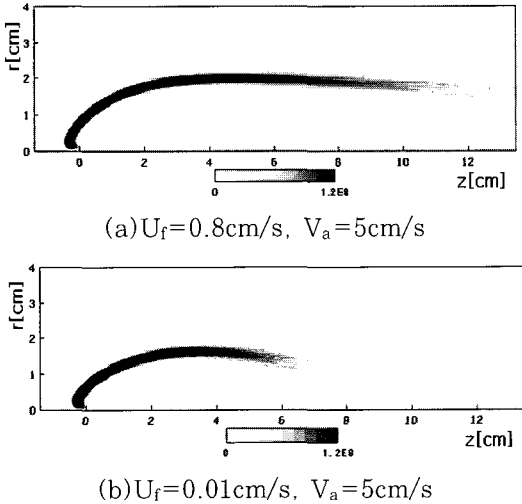


Fig. 10 Flame shape with different U_f

그러나 연료분출속도가 극단적으로 작아지면 화염의 선단이 후퇴하여 화염대가 변동하고 불안정한 화염이 되어 마지막에는 소염한다^[12].

앞에서 서술한 바와 같이 평면버너를 이용한 경우 미소 중력 환경하에서 조차 버너의 가장자리의 영향으로 경계층류 확산화염내 매연입자의 부착거동이 확실하지 않았다. 따라서 본 연구자는 원통버너를 이용하여 버너의 edge 영향을 제거함으로써, 축대칭 화염을 만들어 매연입자의 거동을 보다 정

확하게 파악하였다^[13]. 그러나 원통 버너의 경우 화염의 특성은 그 반경에 의해 영향을 받을 것으로 예상된다. 따라서, 버너 형상의 영향에 대해 검토한다.

Fig. 11은 버너 반경 $r=1, 5, 15\text{mm}$ 에서의 반응을 분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 각기 다른 버너 반경에 따라 화염의 반응율 분포의 형상이 변화한다는 것을 알 수 있다. 전선과 같은 고체연료의 경우, 그 전선의 피복재의 두께가 화염의 형상에 영향을 미친다는 연구가 있다^[24]. 그 연구에 의하면 피복재 두께의 증가에 따라 열분해 가스의 발생량이 증가해 전선에 형성된 화염의 형태

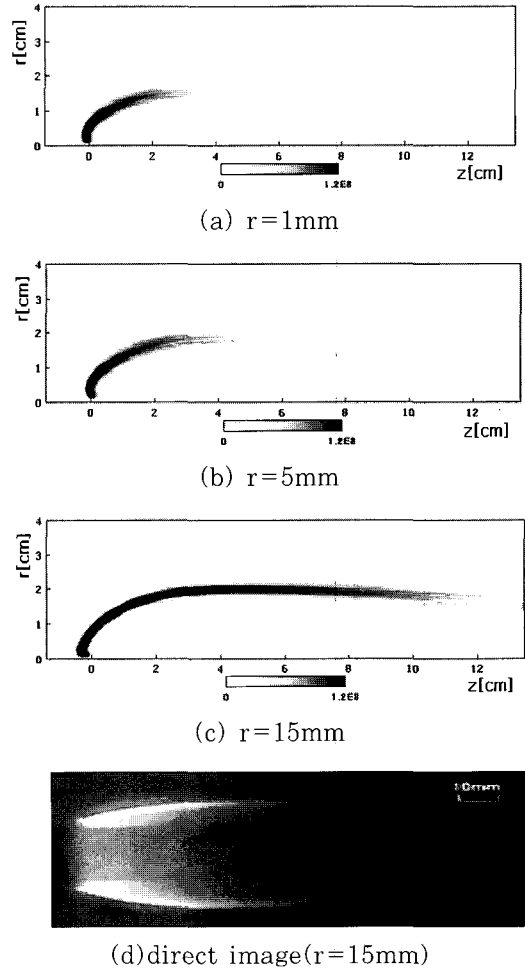


Fig. 11 Reaction rate with different curvature rates(a,b,c) and direct image(d) in microgravity

가 다르다고 설명하고 있다. 본 결과에서는 계산과 같은 조건($U_f=0.8\text{cm/s}$, $O_2=35\%$, $V_a=5\text{cm/s}$, $T_a=300\text{K}$, $T_w=300\text{K}$)에서의 실험 결과인 Fig. 11(d)와 비교했을 때 같은 반경인 $r=15\text{mm}$ 의 경우가 실험의 결과와 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 버너 반경에 의해 발열 분포가 크게 변화하고 버너 반경의 증가와 함께 발열 위치는 버너 벽면으로부터 멀어지고 발열량은 극대치를 가진다. 이와 같이 버너 반경에 따른 화염형상이 뚜렷하게 다르므로 수치계산에 있어서도 반드시 원통 버너의 형상을 고려하여 축대칭 모델을 적용할 필요가 있다. 특히, 실험결과를 바탕으로 수치 계산에 의한 매연입자의 거동을 파악할 때, 화염중의 매연 입자는 화염의 형상에 의해 크게 영향을 받으므로 실험 조건과 같은 반경의 조건으로 계산을 수행할 필요가 있다.

4. 결 론

화염이 벽면을 따라 2차원적으로 형성되는 미소중력환경에서의 벽면 근방 확산 화염을 대상으로 2차원 원통 좌표계를 이용한 수치 계산을 행하여 화염의 유동장, 온도장, 주류 속도와 연료 분출 속도의 변화에 따른 화염 선단 특성과 화염형상의 차이에 대해서 파악 하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 미소 중력환경에서의 벽면 근방 확산 화염의 경우 화염 선단 부근을 통과하는 흐름의 속도는 화염대에 가까워지면서 화염으로부터 화염 전방으로의 체적 팽창력에 의해서 작아지나, 화염대를 통과하면서 점점 빨라져 주류 속도보다 증가하는 속도의 오버 슈트 발생한다.
2. 주류 속도가 큰 경우, 최대 반응율에서의 속도인 V_M 은 커지고 standoff distance인 δ 는 작아진다. 연료 분출 속도가 큰 경우에는 δ 은 증가하지만 V_M 은 큰 변화가 없었다. 이것은 주류 속도가 빠르고, 연료 분출 속도가 느릴수록 화염은 벽면에 가까워지고 화염내 매연입자는 벽면으로 부착하기 쉽다는 것을 의미한다.
3. 버너 반경에 의해 발열량 분포가 크게 변화하는 것을 알 수 있었다. 이는 실험결과를 바탕으로 수치 계산에 의한 매연입자의 거동을 파악할 때, 실험 조건과 같은 반경의 조건으로 계산을 수행 해야 하는 것을 의미한다. 또, 버너 반경이 증가함에 따라 발열 위치는 버너 벽면으로부터 멀어지나 그 발열량은 극대치를 가진다.

참고문헌

- [1] Seegeev, G. T., Smolsky, B. M., and Tar asevich, L.I., *Int. J. Het and Mass Transfer* 13, pp. 1215-1224, 1970.
- [2] Hirano, T., Iwai, K., and Kanno, Y., *Astronaut. Acta*, 17-4/5, pp. 811-818, 1972.
- [3] Hirano, T. and Kanno, Y., "Aerodynamic and thermal structure of the laminar boundary layer over a flat plate with a diffusion flame", *Proc. 14th Proc. Combust. Inst.*, pp. 391-398, 1973.
- [4] Hirano, T., Noreikis, S., and Waterman, T., "Measured velocity and temperature profiles near flames spreading over a thin combustible solid", *Combust. Flame* 23:83, 1974.
- [5] Hirano, T., and Kinoshita, M., "Gas velocity and temperature profiles of a diffusion flame stabilized in the stream over liquid fuel", *15th Proc. Combust. Inst.*, p. 379, 1975.
- [6] Mao, C. P., Komada, H., and Fernandez-pello, A. C., "Convective structure of a diffusion flame over a flat combustible surface", *Combustion and Flame*, 57, (1984), pp. 209-236.
- [7] Ramachandra, A., and Raghunandan, B.N., "Buoyant effects on the

- characteristics of a laminar boundary layer diffusion flame in a confined flow". *Combust. Flame*, 58, pp. 191-196, 1984.
- [8] 植田利久, 溝本雅彦, "層流平板境界層擴散火炎の流體力學的構造", 日本機械學會論文集(B編), 52, pp. 3787-3793, 1985.
- [9] 植田利久, 大島 朗, 齊藤直樹, 溝本雅彦, "層流平板境界層擴散火炎の流體力學的構造(第2報, 實驗的検討)", 日本機械學會論文集(B編), 56, pp. 3501-3507, 1990.
- [10] Ueda, T. and Mizomoto, M., *Computational Mechanics*, Springer-Verlag 5, pp. 263-272, 1989.
- [11] 劉春亮, 鈴木鐸士, 川又正昭, "層流境界層に形成される擴散火炎の構造と特性の數値解析", 日本機械學會論文集(B編), 66, pp. 22-29, 2000.
- [12] 劉春亮, 鈴木鐸士, 川又正昭, "層流境界層に形成される擴散火炎の構造と特性の數値解析(第2報, 燃料供給條件および固體域傳熱特性の影響)", 日本機械學會論文集(B編), 67, pp. 238-246, 2001.
- [13] Choi, J. H., Fujita, O., Tsuiki, T., "Effects of Oxygen Concentration on Soot Distribution and Deposition Characteristics in Laminar Diffusion Flames near Solid Walls in Microgravity", *MEC* 2004, pp. 71-76, 2004.
- [14] Williams, F. A., *Combustion theory*, Second Edition, The Benjamin/Cummings publishing Company, 1985.
- [15] Westbrook, C. K., "Simplified Reaction Mechanisms for oxidation of hydrocarbon fuels in flame", *Combust. Sci. Tech.*, 27, pp. 31-43, 1981.
- [16] Najm, H. N. and Wyckoff, P. S., *combust Flame* 110:92-112, 1992.
- [17] Kim, J., Moin, P., "Application of a fractional-step method to incompressible Navier-Stokes equations", *J. Computational Physics*, 59, pp. 308-323, 1985.
- [18] Wesseling, P., "An Introduction to multigrid methods", John Wiley & Sons Ltd., 1992.
- [19] Mahalingam, S., Cantwell, B. J., and Ferziger, J. H., "Non-premixed Combustion: Full Numerical Simulation of a Coflowing axisymmetric Jet. Inviscid and Viscous Stability Analysis, report TF-43, Thermoscience Division, Stanford University", Stanford, California, 1989.
- [20] Kee, R. J., Rupley, F. M., Meeks, E., and Miller, J. A., "CHEMKIN-III: A FORTRAN Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical and Plasma Kinetics", SAND96-8216, Sandia National Laboratories, Livermore, CA, 1996. T. Kashiwagi, H. Nambu, *Combust. Flame*, 88, pp. 345-368, 1992.
- [21] Kee, R. J., Warnatz, J., and Miller, J. A., "A FORTRAN Computer Code Package for the Evaluation of Gas Phase Viscosities, Conductivities and Diffusion Coefficients", Sandia report SAND83-8209.
- [22] Suzuki, T., Kawamata, M., Matsu-moto, K., and Hirano, T., "Fire Safety Science", *Proc. 3rd Symp.*, pp. 227-236, 1991.
- [23] Takahashi, F. and Katta, V. R., *Centra States Section/ The Combustion Institute Meeting*, 1997.
- [24] 西澤勝弘, "宇宙船内火災安全性向上ため導線被覆材上燃焼擴がりに關する研究", 博士論文, 北海道大學, 2004.

저 자 소 개



최재혁 (崔宰赫)

1974년 3월생, 1996년 한국해양대학교 기관공학과 졸업(학사), 2000년 동대학교 대학원 졸업(석사), 2005년 일본북해도대학 대학원 졸업(박사), 2005년-현재 한국원자력 연구소 연구원.



후지타 오사무(藤田 修)

1974년 3월생, 1982년 일본북해도대학 졸업(학사), 1984년 동대학교대학원 졸업(석사), 1987년 동대학교대학원 졸업(박사), 2003년-현재 일본북해도대학 기계우주학과교수.