

1g와 0g에서의 에틸렌 확산화염 내 매연 생성 특성에 관한 수치적 연구

최재혁¹ · 박상균[†]

(원고접수일 : 2013년 6월 26일, 원고수정일 : 2013년 8월 30일, 심사완료일 : 2013년 9월 10일)

A numerical study on soot formation in ethylene diffusion flames under 1g and 0g

Jae-Hyuk Choi¹ · Sang-Kyun Park[†]

요약: 대기압에서의 층류 에틸렌 확산 화염 내 매연 생성에 대하여 부력의 영향에 대한 보다 나은 이해를 위해 0g와 1g 조건하에서 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 위하여 가스상 메커니즘과 열 및 이송 특성을 이용하였다. 매연의 생성과 성장 및 산화에 대하여 예측하기 위하여 간단한 매연 모델이 채택되었으며 이 모델은 가스상과 매연의 화학적 상호작용에 고려되었다. 수치 결과로서 보다 두꺼운 확산층과 축방향 속도의 감소로 인해 0g에서의 화염이 1g하의 화염보다 더 넓은 화염을 가진다는 알 수 있었다. 0g에서의 축방향 속도의 감소는 더 긴 체류 시간을 가지게 하고 그 결과로 더 많은 매연 체적분율을 나타나게 한다. 0g 하에서는 화염이 부력으로 인한 불안정성이 없어져 화염의 흔들거림이 사라졌다.

주제어: 매연 생성, 확산 화염, 부력, 매연체적분율, 무중력

Abstract: A numerical study on soot formation in a laminar ethylene diffusion flame at atmospheric pressure was conducted to obtain a better understanding of the effects of buoyancy on sooting flames under 0g and 1g using a gas-phase reaction mechanism and thermal and transport properties. A simple model was employed to predict soot formation, growth and oxidation with interactions between the gas phase chemistry and the soot chemistry taken into account. Results showed that the flames in 0g are much wider than that of 1g because of the thicker diffusion layer and reduction in axial velocity. The reduction in the axial velocity in 0g results in longer residence times, and resulting in greatly enhanced soot volume fraction. And, under zero-gravity, due to the lack of a buoyancy-induced instability, flame instability disappears.

Keywords: Soot formation, Diffusion flame, Buoyancy, Soot volume fraction, Zero-gravity

1. 서론

최근 선박으로부터 배출되는 입자상 물질 (Particulate Matters)이 지구의 온난화 효과는 물론 북극해의 해빙에도 영향을 미친다는 보고가 나오고 있다[1]. 특히, IPCC의 기후변화 보고서[2]에 의하면 PM 특히 블랙카본의 온난화지수는 $0.2W/m^2$ 으로 보고하고 있으며, 미국의 연구진은 $0.9W/m^2$

의 한 차수가 큰 값까지도 제시하고 있다[3]. 이로 인해 최근 국내에서는 선급을 비롯한 산학연 협동으로 선박으로부터의 매연이 온난화에 미치는 영향 및 선박에서 발생하는 매연의 기본적인 구조 등을 조사하기 위한 연구가 진행 중이다.

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서도 선박으로부터의 PM을 비롯한 매연

[†] Corresponding Author: Department of Power System Engineering, Kunsan National University, Daehak-ro, Gunsan, Jeonbuk, 573-701, Korea, E-mail: skpark@kunsan.ac.kr, Tel: 063-469-1846

¹ Division of Marine System engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: choi_jh@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4257

(soot)의 배출규제를 강화하려고 하고 있다[4].

일반적으로 선박에서 배출되는 PM을 제어하기 위해서는 매연의 생성에 영향을 주는 연료, 온도 및 체류시간 3대 인자의 영향에 대하여 알아볼 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 가스상 에틸렌 확산화염을 이용하여 매연의 생성 특성에 알아보고자 한다.

매연은 일반적으로 오염 물질로만 잘 알려져 있지만, 화염 내에서는 중요한 복사 매체로서의 역할을 한다. 이로 인해 매연 생성에 관한 연구는 오랜 기간 동안 많은 연구자에 의해서 연구되고 있다 [5]-[7]. Ku et al. [5][6]은 지상중력 및 마이크로중력 화염 내에서 매연 생성에 대한 부력의 영향에 대하여 연구를 수행하였다. Atreya et al. [7]은 실험과 수치해석을 통해 마이크로중력 환경 내에서는 복사 열전달이 매연 생성에 중요하다는 것을 파악하였다. 특히 최근에는 부력에 따른 매연 생성의 연구가 활발히 이루어지고 있다[8]-[10]. Fujita et al. [8]은 지상중력과 마이크로중력환경에서의 실험을 통해 부력의 유무에 따른 열영동력(Thermophoretic force)이 화염 내에서 매연 생성에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. Hermanson et al. [9]는 층류, 천이 및 난류 제트 확산 화염 내에서의 매연 생성에 대한 부력의 효과에 대하여 화염의 높이, 모양 및 산화제의 효과에 대한 다양한 연구 결과를 제시하였다. Jeon et al. [10]은 6m의 낙하탑(Drop tower)을 이용하여 다양한 부분 중력(Partial gravity) 조건에서 확산 화염 내의 매연 생성 특성에 대한 중력의 영향을 조사하였다.

본 연구는 이러한 연구들의 일환으로 매연 생성에 대한 부력의 영향에 대하여 알아보기 위하여 수치해석을 수행하였다. 특히 1g의 지상중력과 0g의 무중력에서의 에틸렌 확산 화염을 대상으로 하여 확산 화염 내 온도 및 속도의 유동 특성과 매연 분포를 조사하였다. 본 연구의 수치해석은 부력과 비부력 화염에서의 매연 특성의 차이점에 대하여 알아보기 위하여 1g와 0g 조건에서의 물리적 및 화학적 과정의 상호작용에 대하여도 고려하여 수행되었다. 또한 확산 화염 내에서 매연 생성 특성 및 탄소나노물질의 합성 연구 등에 있어 이들의

채취를 위한 적정 위치에 대해서 고찰하였다.

2. 수치 시뮬레이션

본 연구의 대상인 동축류 에틸렌 확산화염에 대하여 수치 시뮬레이션을 하기 위해서 2차원의 비정상계산을 수행하였다. 지배 방정식은 질량, 운동량, 에너지, 화학종 성분 및 기체 상태 방정식이며, 반응속도정수는 Arrhenius형 반응식을 이용하여 계산을 수행하였다[11]. 여기서 1차 총괄 반응을 위한 계수로서 선지수 함수(pre-exponential factor)는 $5.8E+12 \text{ g/cm}^3\text{s}$ 이며, 활성화 에너지(Activation energy)는 125.6 kJ/mol 을 적용하였다. 무중력상태의 조건을 맞추기 위해서는 운동량 방정식에서 중력 부분을 제외하여 시뮬레이션을 수행하였다. 화학 반응은 1차의 총괄반응이며 따라서 낮은 마하수 가정(Low mach number approximation)을 적용하였고, 계산의 단순화를 위해서 Soret-Dufour 효과, 압력구배에 의한 확산효과는 무시하였다. 벽면 조건은 버너 부분을 제외한 벽면에는 미끄럼이 존재하지 않는 No-slip condition을, 그리고 출구 조건은 대류경계 조건(Convective boundary condition)을 적용하였다. 계산에 필요한 열역학적 물성치들과 열전달계수는 Chemkin III와 Transport package를 이용하여 해석하였다. 수치 해석을 위한 지배방정식 및 상세한 수치 방법은 선행 연구인 참고 문헌[12]을 참조 하였다.

또한 본 연구에서는 매연의 수밀도(Number density) 및 체적 분율(Volume fraction) 등을 파악하기 위하여 Moss et al. [13]에 의해 제안된 매연 지배 방정식을 도입하여 이에 대해서도 계산이 이루어졌다. 이 지배 방정식은 매연의 핵 생성(Nucleation), 표면 성장(Surface growth), 응집(Coagulation) 및 산화(Oxidation)에 대한 소스항이 포함되어 있다. 아래에 매연 수밀도(1)와 체적분율(2)에 대한 방정식을 나타낸다.

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (nu) = -\nabla \cdot (v_{t,x_i}n) + \omega_n \quad (1)$$

$$\frac{\partial f_v}{\partial t} + \nabla \cdot (f_v u) = -\nabla \cdot (v_{t,x_i}f_v) + \omega_{f_v} \quad (2)$$

이 식에서 n 은 매연 수밀도, f_v 는 매연 체적분율, $v_{t,xi}$ 는 매연의 열영동속도를 나타낸다. ω_n 은 매연 수밀도의 소스항이며 ω_{fv} 는 체적 분율의 소스항이다. 소스항 ω_n 과 ω_{fv} 에 대한 상세한 방정식 및 값들에 대한 내용은 선행 연구[14][15]를 참조하였다. 또한 방정식 (1)과 (2)는 대류와 열영동에 대한 항을 포함하며 특히 열영동 속도에 대해서는 아래의 식으로 정의되는 값을 취하였다[16].

$$v_{t,xi} = -0.54 \cdot \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{\nabla T}{T}, \quad x_i = r, z \quad (3)$$

여기서 ρ 은 밀도, μ 는 점성계수, ∇T 는 온도구배, T 는 온도를 나타낸다. 열영동 효과에 대해서 본 연구에서는 반경방향의 r (속도 u)과 축방향 z (속도 v) 모두에 대하여 적용하였다.

복사의 고려에 대해서는 에너지 방정식에 매연, CO_2 와 H_2O 에 의한 복사 효과를 포함시켰으며, 방정식 (4)의 식으로 나타내었다.

$$-\nabla \cdot q_r = 4a_{\text{overall}} \sigma (T^4 - T_{\infty}^4) \quad (4)$$

여기서, q_r 은 열복사 플럭스, σ 는 스테판 볼츠만 상수 및 a_{overall} 은 전체 플랭크 평균 흡수 계수 (Overall Planck mean absorption coefficient)를 나타낸다.

이러한 전체 플랭크 평균 흡수 계수는 매연에 대한 값에 CO_2 와 H_2O 혼합기체의 계수의 값을 모두 합한 값을 사용하였다[15].

Figure 1은 수치 시뮬레이션을 위한 모델 개략도를 나타낸다. 그림에서는 축대칭좌표를 이용하여 계산하였으므로 그림에서 점선으로 표시된 부분 (Calculation zone)에 대해서만 해석을 수행하였다. 연료는 에틸렌(C_2H_4)를 사용하였으며, 연료와 산화제의 유속은 동일하게 5.1 cm/s 이다. 버너의 내경은 7mm이나 실제의 계산은 반경인 3.5mm에 대해서만 계산을 수행하였다. 그림에서 반경방향(r) 속도가 u , 축방향(z)의 속도는 v 이다. 전체 계산 영역은 $3\text{cm}(r) \times 10\text{cm}(z)$ 이다. 격자수는 $128(r) \times 512(z)$ 이며 균일 간격으로 비정상 계산을 수행하였다.

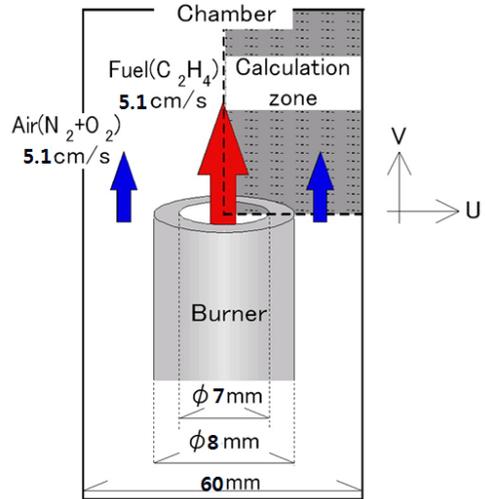


Figure 1: Schematic diagram of computational domain

3. 수치 결과 및 분석

Figure 2는 지상중력인 1g에서의 동축류 에틸렌 확산화염의 온도 분포를 나타낸다. 비정상 상태의 화염온도분포의 변화를 나타낸다. 임의의 시간에서 왼쪽에서부터 오른쪽으로 0.1초 간격으로 변화하고 있다. 전체적인 최고 화염 온도는 2152 K 정도를 나타낸다. 전체적인 화염의 형상은 화염의 온도와 주위공기의 밀도차에 의한 부력의 영향으로 축방향으로 길게, 반경방향으로는 폭이 좁은 것을 알 수 있다. 또한 흥미로운 점은 그림에서 알 수 있듯이 본 연구의 대상인 화염은 지상 중력인 1g에서 어떤 시간 간격을 두고 불안정한 형태로 진동이 발생하고 있는데 순간적으로 화염의 크기가 줄어들면서 다시 커지는 것을 알 수 있다.

이러한 조건에서는 확산 화염 내에서 생성되는 매연의 흐름의 관찰을 비롯해 매연의 생성 및 채취를 하기에는 매우 불리한 여건이다.

또한 최근 많이 이루어지는 연구[17] 중 화염을 이용한 확산 화염 내 탄소나노튜브의 채취를 하기에는 매우 불리한 조건으로 판단된다.

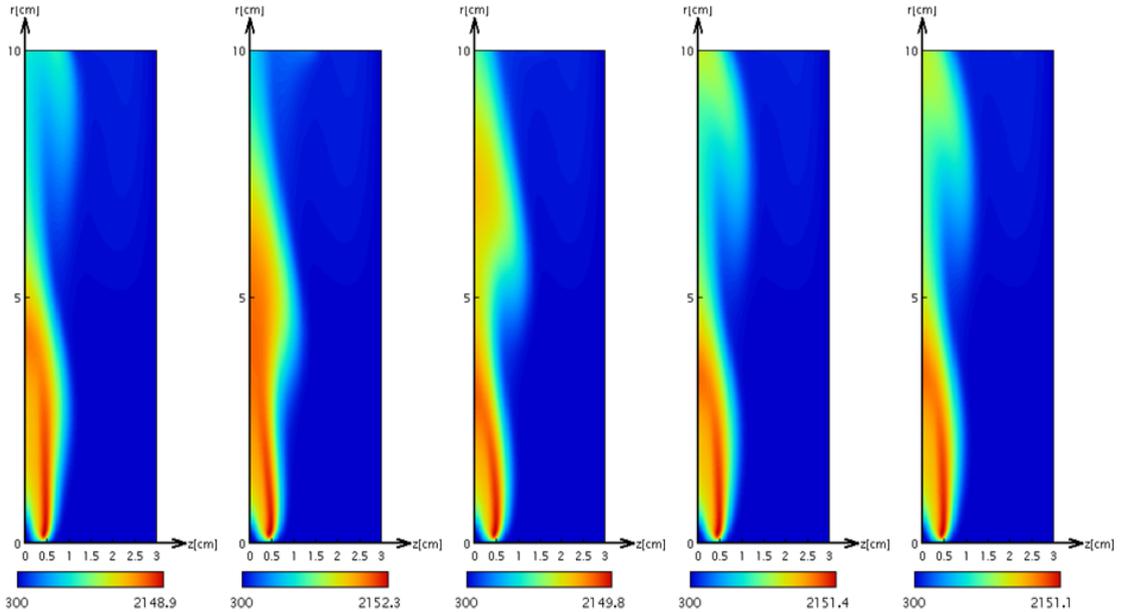


Figure 2: Temperature distribution of coflow ethylene diffusion flames in 1g

Figure 3은 지상중력인 1g에서 마이크로 중력으로 변화하는 동축류 에틸렌 확산화염의 온도분포를 나타낸다. 비정상 상태의 화염온도분포의 변화를 나타낸다. 임의의 시간에서 왼쪽에서부터 오른쪽으로 0.1초 간격으로 변화하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 1g에서 0g로 중력이 변화함에 따라서 화염온도는 2150 K에서 조금씩 계속적으로 낮아져 2123K를 나타내고 있다. 실제적으로 무중력으로 변화함으로써 화염의 온도가 많이 낮아질 것으로 예상되었으나 본 연구에서는 동축류를 대상으로 하고 있으므로 주위에서 충분한 산화제를 공급하고 있기 때문에 예상만큼 화염온도의 급격한 저하는 이루어지지 않았다. 반면에, Figure 4에 무중력 환경 하에서 정지 분위기 상태에서 온도분포를 나타내고 있는데 화염 온도가 많이 낮아진 것을 알 수 있다.

Figure 2에서 나타내듯이 1g에서의 불안정한 화염의 상태는 시간이 지날수록 안정된 화염이 되어가고 있는 것을 알 수 있다. 1g에서 0g로 순간적인 중력의 변화가 일어날 때는 화염의 축방향 길이가 작아졌다가 무중력 상태에서 순차적으로 화염이 커지고 있으며, 화염의 반경은 1cm 정도까지 커

고 있는 것을 알 수 있다. 이는 무중력 상태에 들어서면서 부력이 없어짐으로 인한 화염 내로의 산화제 공급량이 적어져 화염이 주위의 산화제를 공급 받기 위해 커지는 것이다.

Figure 4는 무중력 환경하의 주위 산화제 속도가 0cm/s의 정지 분위기에서의 동축류 에틸렌 확산화염의 온도분포를 나타낸다. 앞서 설명한 바와 같이 화염의 온도는 2079K으로 1g에서의 동축류 에틸렌 확산화염보다 약 70K 정도 낮아진 것을 알 수 있다. 또한 화염의 형상은 축방향으로는 길이가 짧아졌으며, 반경방향으로의 화염 반경은 1g에서의 화염 반경이 약 0.5cm 내외인 반면, 주위 산화제의 속도가 0cm/s의 정지 분위기 상태에서는 약 1.5cm까지 커지고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 주위 유속이 0cm/s 이므로 부력의 영향은 물론 주위 유속에 의한 영향도 없으므로 순수한 연료의 유량에 의하여 화염의 길이가 결정되기 때문에 축방향으로는 짧아지고 반경으로는 커진다고 생각한다. 이러한 조건에서는 축방향 속도도 낮아져 화염 내체류 시간도 더 길어질 것으로 예상되며, 이로 인해 매연의 생성도 많아 질 것으로 생각한다.

Figure 5는 지상중력(1g)과 무중력(0g)에서의 동

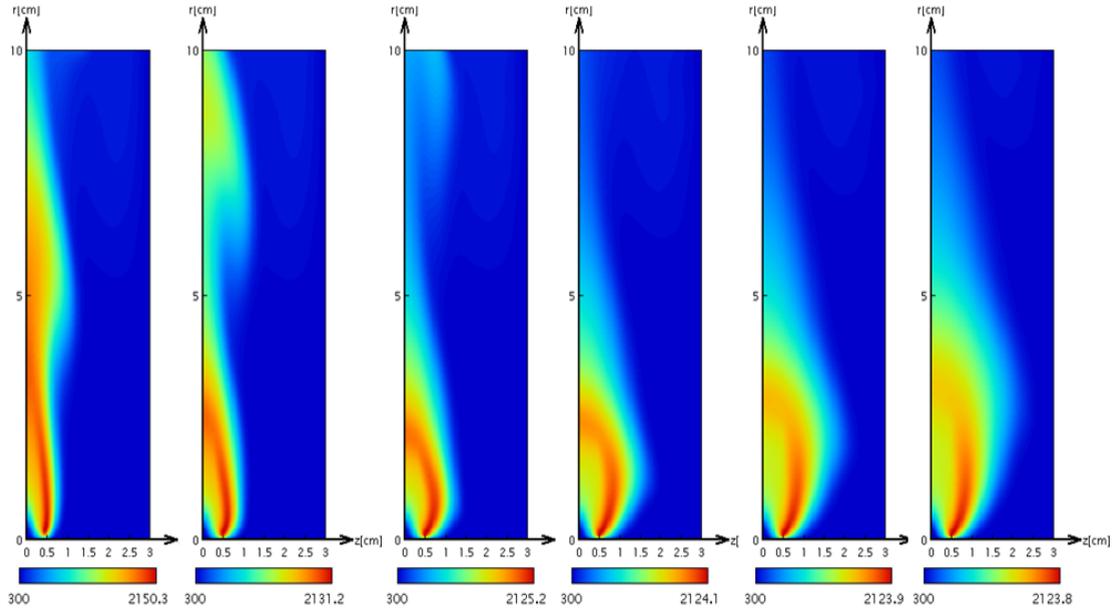


Figure 3: Temperature distribution of coflow ethylene diffusion flames in 0g

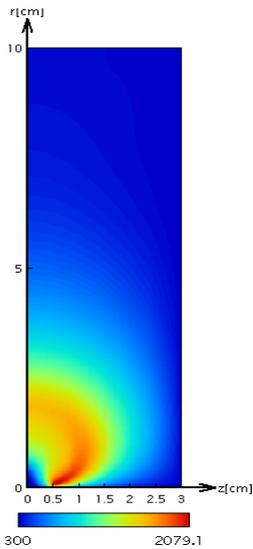


Figure 4: Temperature distribution in 0g (oxidizer velocity is 0cm/s)

축류 에틸렌 확산화염의 속도 분포와 정지 분위기에서의 확산화염의 속도 분포를 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이 지상중력인 1g에서의 화염

내 최대 속도는 208cm/s의 매우 빠른 속도를 나타내고 있는 반면, 마이크로중력 환경에서 주위산화제의 속도가 5.1cm인 경우 확산화염 내 최대 속도는 18.9cm/s로 11배나 느린 속도분포를 나타낸다. 더욱이 동축류가 없는 상태의 정지된 산화제 분위기에서는 최대 속도가 14.2cm/s를 나타내고 있다.

이러한 결과는 일반적으로 실제 화염 내에서 매연의 흐름의 관찰이나 매연의 채취를 위해서는 가능한 한 화염 내 속도가 느린 것이 유리하다고 할 때 1g에서의 관찰이나 매연의 채취는 매우 어려운 환경이 될 수 있다는 것을 의미하며, 반대로 무중력 또는 마이크로 중력에서는 유리한 조건이라는 것을 의미한다. 또한 화염 내에서의 유속이 느리다는 것은 화염 내에서 매연의 체류시간이 길어질 것이라는 것을 의미하며, 이는 매연의 생성량이 증가할 수 있다는 것을 나타낸다. 이 결과는 무중력 또는 마이크로 중력에서의 화염은 화염 내 많은 양의 매연이 긴 체류시간을 가져 복사열 방출이 많아져 화염의 온도는 낮아질 것이라는 나타낸다.

더불어 탄소나노물질의 생성 및 채취에 있어서는 체류 시간이 그만큼 길어지고 그에 따라 탄소나노물질의 생성되는 량도 많아질 가능성이 있다는 것

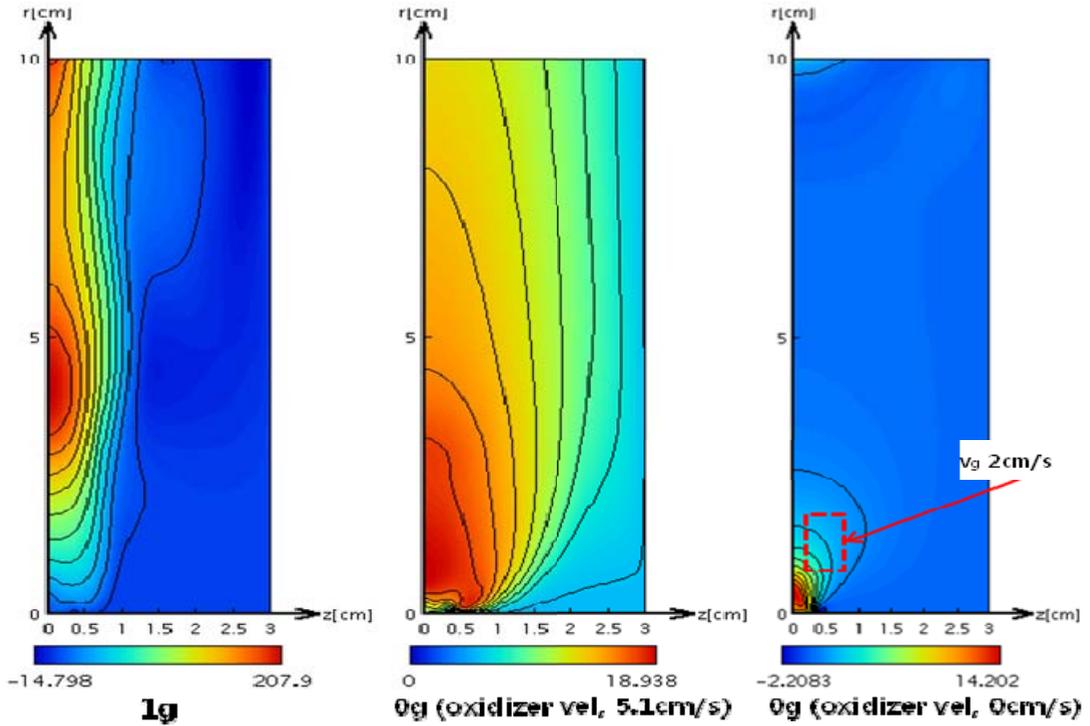


Figure 5: Velocity distribution in 1g and 0g

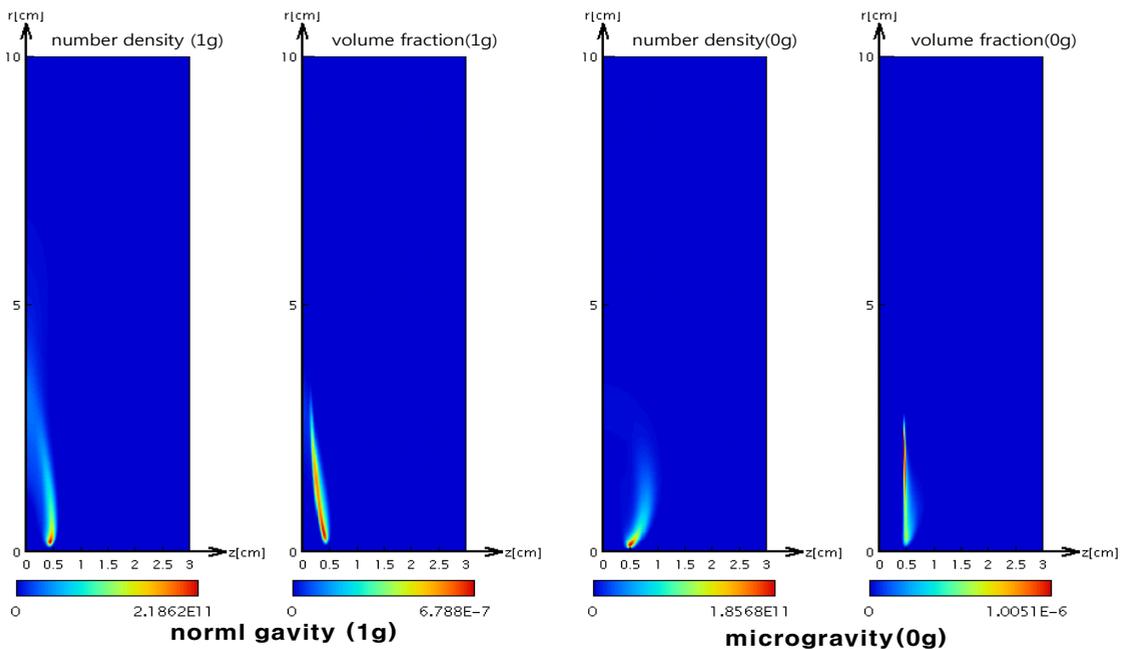


Figure 6: Number density and volume fraction of soot particles in coflow diffusion flames in 1g and 0g

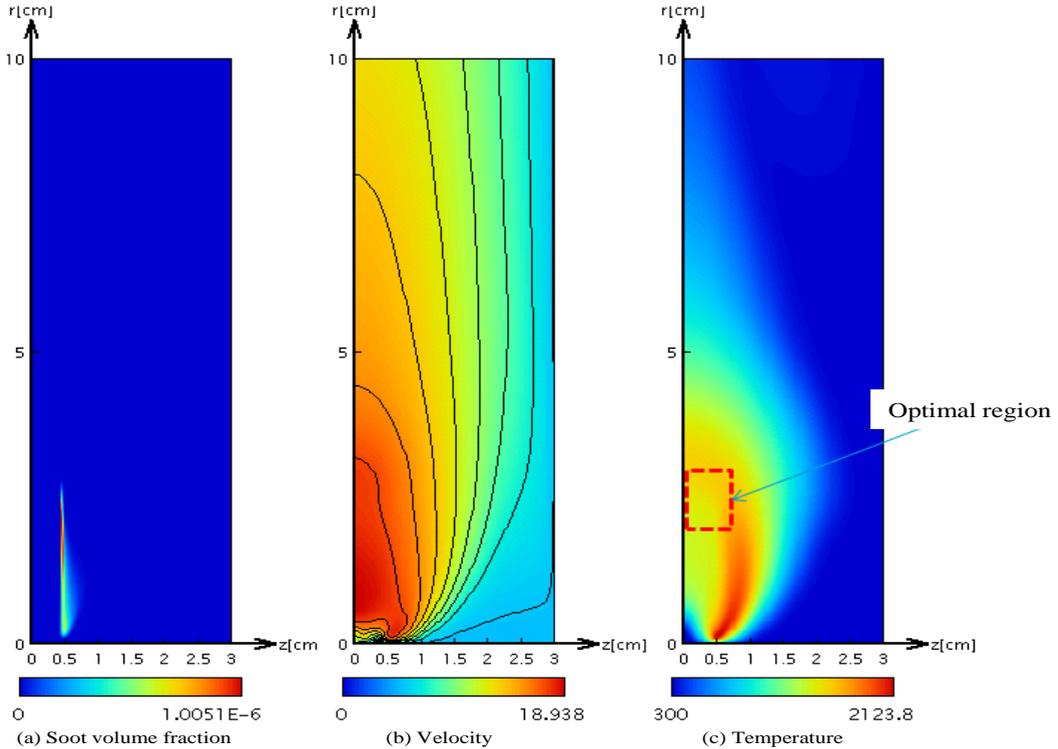


Figure 7: Distributions of soot volume fraction, velocity and temperature in coflow diffusion flame under 0g

을 의미한다. 요약하면 지상중력 환경의 화염 내에서는 매연과 탄소나노물질의 채취에는 많은 제약이 있다는 것을 나타내고 있으며 마이크로 중력 환경에서는 그만큼 매연 및 탄소나노물질의 생성 메커니즘을 비롯한 여러 가지 물리적 현상을 파악하는데 매우 유리하다는 것을 보여주고 있다.

Figure 6은 지상중력 1g와 무중력 0g에서 동축류 에틸렌 확산화염 내의 매연 수밀도와 매연 체적 분율을 나타낸다. Fig. 6에서 나타낸 결과는 앞서 설명한 매연 생성과 관련한 방정식 (1)~(4)를 이용하였다. 결과에서 알 수 있듯이 지상중력에서의 수밀도는 무중력의 수밀도 보다 큰 값을 나타내고 있다. 그에 반해 매연의 체적 분율은 지상중력 환경에서는 최고 체적분율 값이 6.788×10^{-7} 을 나타내고, 무중력 환경에서는 최고 체적분율 값이 1.005×10^{-6} 이다. 무중력 환경에서의 매연 체적 분율이 약 1.48배 증가하였다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 앞

서 서술한 바와 같이 무중력 환경에서 축방향 속도의 감소로 인하여 화염 내에서 매연 생성을 인한 충분한 체류시간을 가지기 때문이다. 또한 무중력 환경에서 보다 큰 매연 체적분율을 나타내는 것은 지상중력환경에서는 빠른 유속으로 인해 1차 입자의 작은 매연들이 많이 분포한 반면 무중력에서는 느린 유속으로 인해 화염 내 생성되는 매연들이 응결을 위한 상대적으로 충분한 시간적 여유가 있기 때문에 직경이 큰 매연들이 많이 분포하게 된다.

이러한 결과는 확산 화염 내 생성되는 매연의 채취와 탄소나노물질의 채취에 있어 각각의 적정 위치를 파악하는데 있어 매우 중요한 수치 데이터로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

Figure 7은 무중력 환경에서 동축류 에틸렌 확산화염 내의 매연체적분율, 속도분포 및 온도 분포를 나타낸다. 앞서 나온 결과들을 요약한 것으로 동축류 확산 화염 내에서 탄소나노물질

등의 채취를 위한 최적의 위치에 대해서 나타내었다. 일반적으로 무중력 환경하에서 확산 화염 내 탄소나노튜브의 채취를 위한 최적의 위치로는 그림에서 나타난 바와 같이 확산 화염 내 매연의 분포가 많고 유속이 느리며 탄소나노물질의 합성이 가능한 1400K 전후의 온도 분포를 가진 지역이어야 하는데 그 위치를 나타내면 온도분포 그림의 점선 사각형 범위로 생각할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 1g의 지상중력과 0g의 무중력에서의 부력의 영향에 의한 에틸렌 확산 화염 내 매연의 생성 특성을 파악하기 위하여 수치 시뮬레이션을 통하여 확산 화염 내 온도 및 속도의 유동 특성과 매연 분포를 조사하였다.

그 결과 동축류 에틸렌 확산화염의 경우 지상중력인 1g에서는 부력으로 인해 불안정한 화염 형상을 나타내고 있는 반면, 무중력인 0g에서는 안정된 화염 형상을 나타내었다. 화염의 온도는 무중력 환경에서 동축류 확산화염의 경우가 30K 정도 낮아졌으며, 확산화염 내 최대 속도는 11배나 느린 속도분포를 나타낸다. 이러한 결과는 확산 화염내의 느린 유속으로 인해 체류 시간의 증가로 인해 매연 생성이 유리하다는 것을 의미한다.

또한 매연의 농도를 조사한 결과 지상중력 환경에서는 최고 매연 체적분율 값이 6.788×10^{-7} 인 반면, 무중력 환경에서는 최고 매연 체적분율 값이 1.005×10^{-6} 로 무중력 환경에서의 매연 체적 분율이 약 1.48배 증가하였다. 무중력 환경에서 보다 큰 매연 체적분율 값을 나타낸다는 것은 지상중력환경에서는 1차 입자의 작은 매연들이 많이 분포된 반면 무중력에서는 촉방향 속도의 감소로 인한 화염 내 매연의 충분한 체류 시간으로 인해 화염 내 매연들의 활발한 응결 작용으로 인해 직경이 큰 매연들이 많이 분포하고 있다는 것을 의미한다. 또한 확산 화염 내에서의 매연 및 탄소나노물질의 채취 및 생성 특성의 파악을 위해서는 무중력 및 마이크로중력 환경을 이용한 확산 화염 내에서 이

루어지는 것이 유리하다고 판단된다.

참고문헌

- [1] D. A. Lack and J. J. Corbett, "Black carbon from ships: a review of the effects of ship speed, fuel quality and exhaust gas scrubbing," Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, vol. 12, pp. 3509-3554, 2012.
- [2] IPCC, An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2007: Synthesis report, Valencia, Spain, 12-17 Nov, 2007.
- [3] V. Ramanathan and G. Carmichael, "Global and regional climate changes due to black carbon," Nature Geoscience, vol. 1, pp.221- 227, 2008.
- [4] IMO(International Maritime Organization), "Prevention of Air Pollution from Ships," Marine Environment Protection Committee 62nd session, MEPC 62/4/3, pp. 1-4, April 2011.
- [5] P. S. Greenberg and J. C. Ku, "Soot volume fraction maps for normal and reduced gravity laminar acetylene jet diffusion flames," Combustion and flame, vol. 108, pp. 227-230, 1997.
- [6] J. C. Ku, D. W. Griffin, P. S. Greenberg, and J. Roma, "Buoyancy-induced differences in soot morphology," Combustion and flame, vol. 102, pp. 1-20, 1995.
- [7] A. Atreya and S. Agrawal, "Effect of radiative heat loss on diffusion flames in quiescent microgravity atmosphere," Combustion and Flame, vol. 115, no. 3, pp. 372-382, 1998.
- [8] O. Fujita and K. Ito, "Observation of soot agglomeration process with aid of thermophoretic force in a microgravity in a microgravity jet diffusion flame," Journal of Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 26, no. 2-4, pp. 305-311, 2002.
- [9] J. C. Hermanson, H. Johari, D. P. Stocker, and U. G. Hedge, "Buoyancy effects in strongly

- pulsed turbulent diffusion flames,” *Combustion and Flame*, vol. 139, no. 1-2, pp. 61-76, 2004.
- [10] B.-H. Jeon and J. H. Choi, “Effect of buoyancy on soot formation in gas-jet diffusion flame,” *Journal of Mechanical Science and Technology*. vol. 24, no. 7, pp. 1537-1543, 2010.
- [11] F. A. William, *Combustion Theory*, Second edition, California, USA, the Benjamin/Cumming Publishing company. 1985.
- [12] J. H. Choi and F. Osamu., “Numerical simulation in characteristics of laminar diffusion flame placed near wall in microgravity,” *Journal of Korean Society of Marine Engineering*. vol. 30, no.1, pp. 140-149, 2006 (in Korean).
- [13] J. B. Moss, C. d. Stewart, and K. J. Young, “Modeling soot formation and burnout in a high temperature laminar diffusion flame burning under oxygen-enriched condition,” *Combustion and Flame*, vol. 101, no. 4, pp. 491-500, 1995.
- [14] J. H. Choi, J. Kim, S. K. Choi, B. H. Jeon, O. Fujita, and S. H. Chung, “Numerical simulation on soot deposition process in laminar ethylene diffusion flames under a microgravity condition,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 23, pp. 707-716, 2009.
- [15] C. R. Kaplan, S. W. Baek, E. S. Oran, and J. L. Ellsey, “Dynamic of a strongly radiation unsteady ethylene jet diffusion flame,” *Combustion and Flame*, vol. 96, no. 1-2, pp. 1-21, 1994.
- [16] Waldmann., “On the motion of spherical particles in nonhomogeneous gases,” New York, Academic Press Inc., pp. 323-344, 1961.
- [17] J. H. Choi, J. H. Kim, W. J. Shin, J. S. Choi, K. B. Ryu, S. M. Lee, S. H. Park, J. H. Lee, and T. W. Lim, “A study on synthesis of carbon nanomaterial as a material for eco-ship,” *The Korean Society of Marine Environment & Safety*, vol. 18, no. 5, pp. 468-474, 2012 (in Korean).