

국제우주정거장 화재안전 연구개괄: 마이크로중력화염의 특성 (점화/형상/전파/소멸특성)

박설현* · 황철홍***

Overview of Fire Safety onboard International Space Station(ISS): Characteristics of Flame Ignition, Shape, Spread, and Extinction in Microgravity

Seul-Hyun Park and Cheol-Hong Hwang

ABSTRACT

Due to a significant leap in the science and technology, the manned space exploration that has started with suborbital flights is now being expanded into the deep space. The space superpowers such as the U.S. and Russia have been making an effort to further develop the manned space technology. Among such technologies, the fire safety technology in microgravity has recolonized as one of the most critical factors that must be considered for the manned space mission design since the realistic fire broke out onboard the Mir station in 1997. In the present study, the flame characteristics such as flame ignition, shape, spread, and extinction that are critical to understand the fire behavior under microgravity conditions are described and discussed. The absence of buoyancy in microgravity dominates the mass transport driven by diffusio-phoretic and thermo-phoretic fluxes (that are negligible in normal gravity) and influences the overall flame characteristics-flame ignition, shape, spread, and extinction. In addition, the cabin environments of the pressurized module (PM) including the oxygen concentration, ambient pressure, and ventilation flow(which are always coupled with microgravity condition during the ISS operation) are found to be the most important aspects in characterizing the fire behavior in microgravity.

Key Words : International Space Station(ISS), Microgravity, Ignition, Flame shape, Flame spread, Extinction

1. 서론

지구상에서 중력은 절대적인 힘으로 작용하고 있기 때문에 경우에 따라서 복잡한 물리·화학적 현상을 연구하고자 할 때에는 장애의 요소가 되기도 한다. 완전한 무중력환경은 실제 지구궤도상을 선회하고 있는 위성이나 우주정거장에서도 얻을 수 없는 이상적인 환경이지만, 이들을 활용하면 중력의 영향을 최소화할 수 있게 되어 무중력상태에 근접한 마이크로중력(이하 μG)환경을 만들어 낼 수 있다. μG 은 지구상의 물체에 작용하는 중력을 1G라고 할 때 10^{-6} G의 중력크기를 지칭하는 용어이지만 줄어든 중력크기에 따라 Reduced gravity로 표현하기도 한

다. 우주정거장의 실험환경인 μG 조건을 형성하기 위해서는 지구의 중력장에서 멀리 떨어지는 방법 (640만km)이 가장 간단한 방법이지만 지구의 중력장하에 있다 하더라도 지구 중심방향으로 자유낙하를 통해서 최대 10^{-6} G의 μG 를 조성할 수 있다. 실제 우주정거장을 포함한 대부분의 우주 실험설비는 자유낙하를 통하여 μG 환경을 조성하고 있다.

μG 환경의 대표적인 특성중 하나는 중력의 크기와 밀접한 관련이 있는 부력이 거의 사라지게 된다는 점이다. 중력장에서는 화염 주위의 밀도차로 발생되는 부력의 영향으로 강한 유속이 형성되지만 μG 환경에서는 화염 주위에 부력에 의한 유속은 거의 존재하지 않는다. 따라서 화염의 형상이 부력의 크기에 따라 크게 변하게 된다. 일반적으로 화염영역 두께, δ_g (Flame zone thickness)는 식 (1)과 같이 화염 주위의 유속(U)과 가스의 열확산률(α_g)과의 관계로 나타낼 수 있다[1].

* 한국항공우주연구원 항공우주융합기술연구소

** 대전대학교 소방방재학과

† 연락저자, chehwang@dju.ac.kr

$$\delta_g = \frac{\alpha_g}{U} \quad (1)$$

식 (1)에서 유추할 수 있는 것처럼, μG 화염은 중력장에서 발생하는 화염에 비해 무시할 만한 유속 조건에서도 화염이 형성될 수 있으며 이러한 조건에서는 화염두께가 상대적으로 크게 증가할 수 있게 된다. 결국 두꺼워진 화염영역으로 인해 복사열전달 메카니즘이 중력장에서 발생한 화염에 비해 중요해지고, 특히 복사 열전달과 밀접한 관련이 있는 연소 생성물인 CO_2 및 H_2O 등이 낮은 유속으로 인해 중력장 화염에 비해 화염 내에 체류하는 시간이 길어져 더 큰 복사열손실을 초래할 수 있다[1-3].

또한 μG 환경에서는 부력이 거의 존재하지 않아서 화재 시 발생하는 연기입자 역시 지상에서와는 다른 방식으로 이동하게 된다. 따라서 화재검출기 (smoke detector)의 위치도 이에 맞게 설정되어야 한다. 국제우주정거장의 가압모듈(pressurized module, PM)내에는 공기의 정화 및 온·습도 유지를 위해 Environmental Control and Life Support System (ECLSS)이 갖추어져 있다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이 PM의 오른쪽과 왼쪽 천장 측면에 설치된 6~8개의 Air diffuser를 통해 공기를 공급하고 바닥의 오른쪽과 왼쪽 측면에 설치된 Return register를 통해 공기를 회수하여 온·습도 조정 및 정화과정을 거쳐 재순환시키며 이 과정을 통해 부수적으로 모듈 내 강제 환기 유속($\sim 100 \text{ cm/s}$)을 발생시킨다[1,4]. 부력이 존재하지 않는 μG 환경에서는 화재로 발생한 연기가 천정 쪽으로 이동하지 않고 강제 환기유속을 따라 움직이게 되므로 화재감지기는 대부분 모듈내 공급된 공기

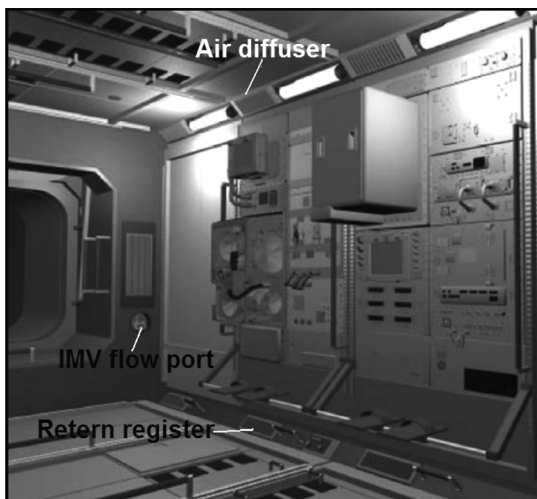


Fig. 1. Ventilation ports installed in Japanese experiment module: Image taken from the reference[5].

를 회수하는 Return register에 설치되어 있다[4,6]. 이처럼 가압모듈 내부의 발생된 강제 환기유속은 화재 검지에 유용하지만 화염의 전파에 큰 영향을 줄 수 있으므로 화재 연구 시 반드시 고려되어야 인자이기도 하다. 더불어 가압모듈 내부의 유속은 밸브의 단속을 통해 언제든지 조절할 수 있으므로 환기 유속이 전혀 존재하지 않는 정적환경(quiescent environment) 역시 유속이 존재하는 경우와 함께 연구되어야 한다.

그렇다면 μG 환경에서 화염특성이나 화재안전에 영향을 미칠 수 있는 또 다른 요소들은 어떤 것들이 있을까? 우주유영을 위해 우주인이 착용하게 될 우주복의 착의 과정을 살펴보면 뚜렷하게 알 수 있다. 가압모듈 밖 우주선 절대진공상태에 있다. 따라서 1기압으로 유지되고 있는 가압모듈에서 우주복을 입고서 우주로 나가게 되면 우주복은 팽창하여 우주인의 우주유영이나 작업활동에 영향을 주게 될 것이다. 그래서 압력차의 영향을 최소화하기 위해 0.3기압 까지 선실의 압력을 감압한 상태에서 우주인은 우주복으로 갈아입게 된다[7]. 하지만 Fig. 2에 도시되어 있는 것처럼 인간이 생명리듬을 유지하기 위해서 총압력이 감소함에 산소 농도는 따라 증가해야 한다. 그래서 감압과 함께 선실의 산소는 증가하고 선실기압이 0.3기압에 이르면 선실의 산소농도는 100%에 도달하게 된다. 일반적으로 재료의 가연성은 산소분율이 증가함에 따라 증가하게 됨으로 선실의 압력을 낮추게 되면 그만큼 화재의 가연성이 높아지게 된다[8]. 따라서 가압모듈 선실내부의 환경특성을 고려해볼 때 화염의 특성과 화재안전에 관한 내용들은 산소농도와 압력과의 관계와 결부되어 설명되어야 할 것이다.

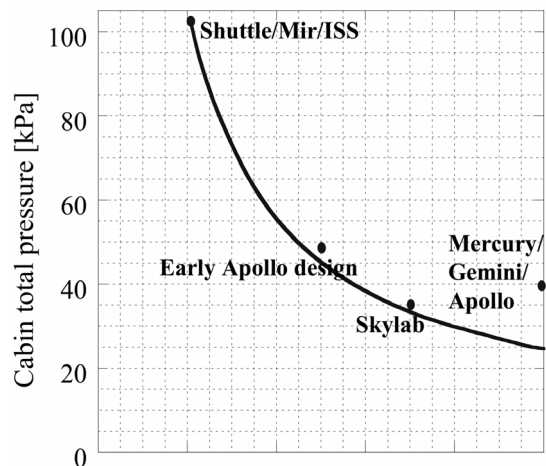


Fig. 2. Required cabin pressure plotted as a function of volume percent oxygen[7].

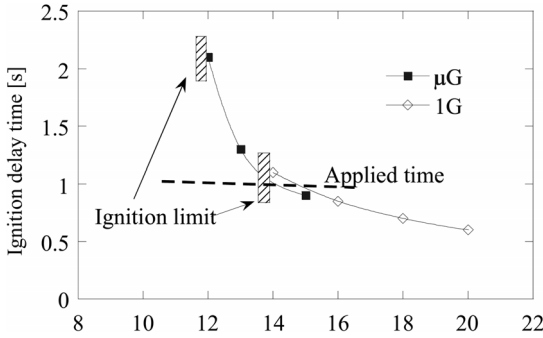


Fig. 3. Ignition limits and delay times of the electrical cable flame as a function of current supply[9].

2. 마이크로중력에서의 화염특성

2.1. 점화에너지

앞서 언급한 바와 같이 우주정거장에서 화재를 예방하기 위해서는 μG 환경이 화재발생에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 이해가 선행되어야 한다. 실제로 μG 환경에서는 작동 중 가열된 기계부품이나 전자(전기)부품의 표면은 열원이 제거되어도 쉽게 냉각되지 않는다. 이는 중력의 영향이 사라짐으로써 부력에 의한 자연대류가 거의 발생하지 않기 때문이다. 따라서 발열이 많은 부품들이 적절한 냉각 과정 없이 오랜 시간 동안 작동하다보면 그만큼 화재에 노출되기 쉽다. 가령 우주정거장에서 사용되는 전선의 피복물질이 가열되어 전선주위에 가연혼합물이 생성될 경우 Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼 μG 환경에서는 지구중력환경(1G)에서보다 적은 점화에너지($\propto \Gamma^2$)로도 화염이 발생할 수 있다. 또한 지구의 중력환경과 비교해 볼 때 점화한계(Ignition limit) 역시 1초가량 확장됨을 확인 할 수 있다. 이는 1G환경에서는 가열된 전선 주위의 가연가스 밀도가 낮아져 발생된 부력에 의해 대부분의 가연가스가 중력의 반대방향, 즉 전선 위쪽으로 이동하지만 μG 환경에서는 주로 가연가스의 확산은 주로 농도차에 의존하여 진행되므로, 가연가스가 비교적 전선 주위에 균일하게 누적되어 분포하게 된다. 따라서 μG 환경에서는 보다 쉽게 점화한계가 확장될 수 있으며, 시간이 지나면서 축적된 가연가스로 인해 1G환경에 비해 점화 직후 더 강한 연소반응을 일으킬 수 있다.

2.2. 화염 형상 및 전파

μG 환경에서 정상상태에 이룬 화염은 어떤 모습일까? Fig. 4에 도시되어 있는 간단한 촛불실험의 결과를 통해서 쉽게 그 답을 얻을 수 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 μG 환경에서는 1G환경과 같은 조건에서 청염의 반구형상 화염이 형성되며 끝부분만 약

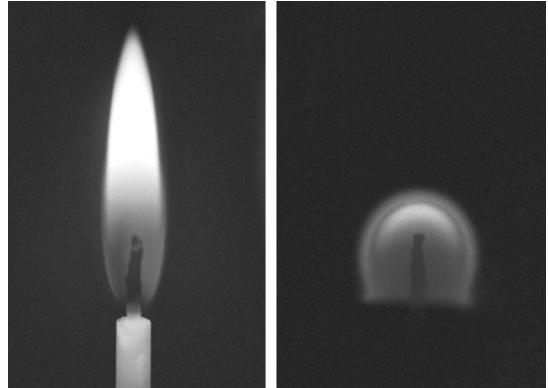


Fig. 4. Burning of Candle in 1G(left) and μG (right): images taken from the NASA webpage[15].

간의 오렌지색을 띤다. 이는 부력의 영향이 거의 사라지고 연료와 산화제가 주로 분자확산에 의존하여 반응영역에 전달되며, 식 (1)로부터 예측할 수 있는 것처럼 확장된 화염영역으로 인해 복사열전달을 통한 열손실이 커지게 되고 화염온도가 낮아져 soot의 발생이 현저히 줄어들기 때문이다[10-12]. 낮아진 화염온도는 다시 연소율(burning rate: 단위 시간당 초의 왁스 소모량)을 낮추게 되며 줄어든 연료의 공급으로 인해 화염은 소멸되게 된다[13,14]. 이러한 현상은 화재안전측면에서 보면 상대적으로 낮은 온도의 약한 화염이 상당 시간 동안 국지적으로 지속될 수 있어 화염의 초기감지가 그만큼 어려워진다는 것을 의미하며 파일럿 점화원이 될 수도 있다. 화염주위에 아무런 유속의 변화가 없는 정적환경에서는 화염온도가 낮은 경우 화염전파는 제한되기 때문에 난연물질로 보호되어 있는 국제우주정거장 선실의 특성상 화재로는 이어질 가능성이 낮지만 앞에서도 언급한 것처럼 선실 내에 존재하는 환기유량과 산소농도가 바뀔 수 있는 실제 환경과 결부되어 화재로 이어질 개연성도 무시할 수 없다.

선실내의 환경(산소농도, 선실압력)이 화염의 특성에 미치는 영향에 대해서는 μG 환경에서 발생된 적화염(droplet flame)을 통해서 좀 더 자세히 알아볼 수 있으며 실제로 지난 50년 동안 μG 환경에서 발생된 액적화염의 해석을 통해 복잡한 연소현상을 이해하고자 하는 노력이 지속되고 있다[1,3]. Fig. 5는

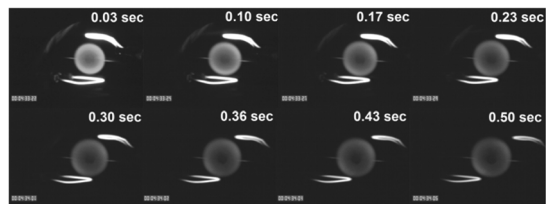


Fig. 5. Burning of heptane droplet in microgravity.

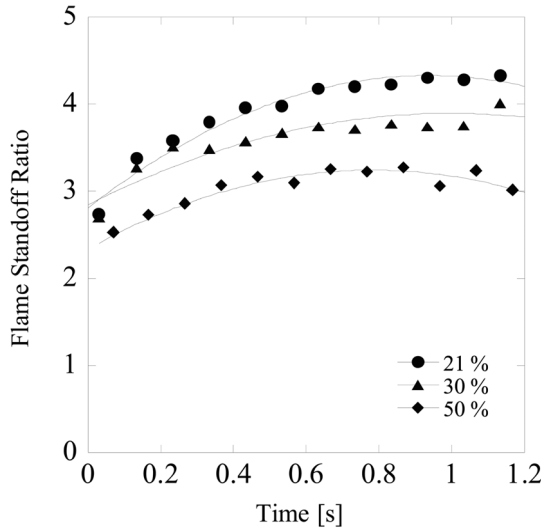


Fig. 6. Flame stand off ratio as a function of oxygen concentration in atmospheric environment.

대기압 하에서 점화된 헵탄(heptane) 액적화염의 연소과정을 보여주고 있는 그림이다. μG 환경에서는 대부분의 전달(transport)현상이 대부분 반경방향으로 이루어지므로 그림에서 보이는 것처럼 구형의 화염이 형성된다.

Fig. 6은 대기(선실)의 산소농도가 화염형상에 미치는 영향을 알아보기 위해 대기 중의 산소농도를 증가시키며 화염의 크기를 측정한 결과를 도시한 그래프이다. 그림에서 y축은 화염크기를 표현하는 무차원수(Flame stand off ratio, 식 (2) 참조)이다. 주어진 조건에서 모두 점화 직후 산소농도가 증가함에 따라 화염의 크기가 증가하다가 준 정상상태(quasi-steady state)에 도달하여 화염크기가 일정한 수준으로 안정화되는 것을 볼 수 있다. 이는 확산화염의 특성상 연료와 산화제가 이론당량비로 반응하는 면에 화염이 형성되기 때문에 점화 직후 액적주위에 기화된 연료가 농축하여 산소가 많은 대기 중으로 화염이 전파되는 특성 때문이다. 비슷한 관점에서 산소농도가 증가하면 그 만큼 화염이 멀리 확장하지 않아도 될 만큼의 산소가 화염면 주위에 존재하게 된다. 그러므로 Fig. 6에서 도시되어 있는 바와 같이 산소농도가 증가함에 따라 화염의 크기는 작아지게 된다[11,16]. 이러한 현상은 식 (2)에 잘 표현되어 있다.

$$\frac{r_f}{r_s} = \frac{\ln(1+B)}{\ln\{(v+1)/v\}} \quad (2)$$

위 식에서 r_f 와 r_s 는 각각 화염과 액적의 반지름을 v 는 이론공연비를 의미한다. 또한 B는 연소열(heat of combustion)과 기화열(heat of vaporization)에 의해

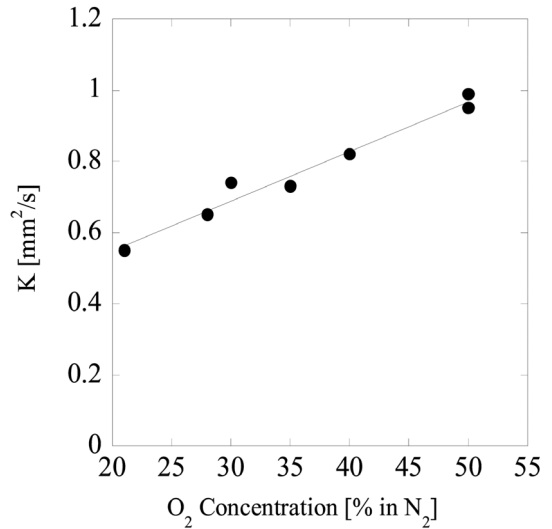


Fig. 7. Burning rate of droplet as a function of oxygen concentration in air.

발생되는 증발력의 비를 나타내는 열역학적 무차원수로 연료에 따라 그 값이 1~10인 것으로 알려져 있다[17]. 식 (2)에 따르면 화염의 위치는 무차원수 B와 이론공연비(v)의 관계를 통해 결정되므로 산소량이 많은 경우 그 만큼 화염의 크기가 작아지게 된다. 또한 산소량의 증가는 Fig. 7에서 볼 수 있는 것처럼 연소율(burning rate, K: 단위시간당 액적의 소모율)을 크게 증가시킨다. 이는 화염 온도의 증가로 인해 액적으로의 열전도가 증가되어 액체연료의 증발이 촉진되어 일어나는 현상이다[10].

Fig. 8은 대기압의 변화가 연소율과 화염크기 미치는 영향을 보여준다. 산소량의 변화는 연소율과 화염크기에 큰 영향을 미치는 반면에 대기압의 변화에

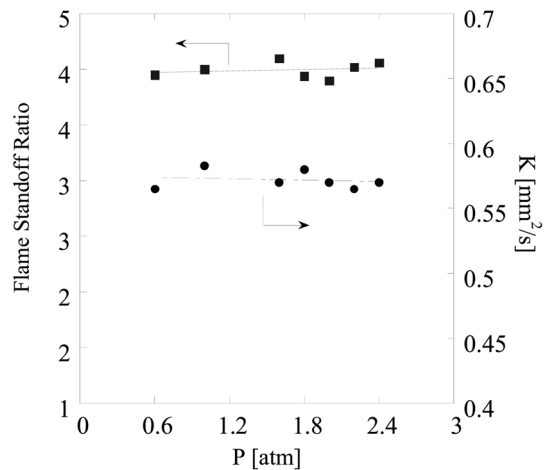


Fig. 8. Measured flame stand off ratio and burning rate plotted as a function of ambient pressure.

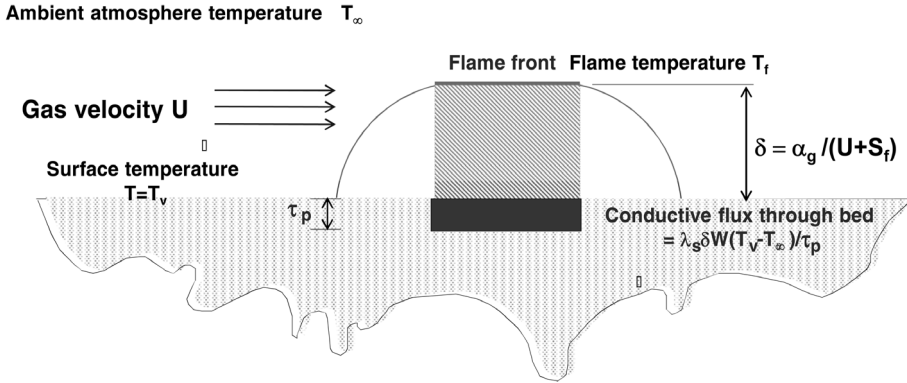


Fig. 9. Schematic of flame spread on a plate solid fuel in microgravity.

는 이들 파라미터들이 민감하게 반응하지 않음을 보여준다. 이는 압력의 변화가 식 (2)에 포함되어 있는 요소들에 큰 영향을 미치지 않을 뿐만 아니라 압력 변화에 따른 온도변화 역시 크지 않기 때문이다. μG 액적화염의 분석결과를 종합해 보면 선실의 압력변화는 화염의 형상 및 연소율에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 산소량의 증가는 작고 강렬한 화염을 형성시켜서 국지적으로 가연물 표면을 통한 열전도를 급격히 증가시켜 화재의 발생 개연성을 높이지만 줄어든 화염 크기로 인해 초기 화재의 감지에 어려움이 뒤따를 것으로 예상해 볼 수 있다. 결국 우주인이 우주 유영을 준비하면서 우주복으로 갈아입는 과정 중 선실의 압력을 감압하고 산소의 농도를 올리는 것이 화재의 감지 및 발생에 취약할 것으로 추측해 볼 수 있다.

μG 환경에서의 화염 전파현상에 대해서는 다양한 화염형상과 조건[9-14,18-21]에서 연구되어 왔지만 Fig. 9에 도시된 평판 고체연료(Fuel bed)[18,19]에서의 화염 전파현상을 살펴보는 것이 보다 실제적인 화염 전파현상을 이해하는데 도움이 될 것이다. 평판 고체연료에서 화염 전파율, L_f 는 고체연료 표면으로 작용하는 단위면적당 열유속과 고체연료의 엔탈피 증가율의 상관관계에 의해서 식 (3)으로 정의될 수 있다[1,22].

$$L_f = \frac{q\delta_g}{\rho_s C_{p,s} (T_v - T_\infty) \tau_s} \quad (3)$$

위 식에서 q 는 열유속이며, ρ_s , $C_{p,s}$, τ_s 각각 고체연료의 밀도, 비열, 두께를 의미한다. 고체연료 내로 열전도를 무시할 수 있는 경우(thermally-thin, $\tau = 1$) 열유속은 화염에서 가스로의 열전도, $q \equiv \lambda_g(T_f - T_v) / \delta_g$ 로 표현할 수 있으므로 식 (3)은 식 (4)와 같이 다시 재정의 될 수 있다.

$$L_{f_thin} = A \frac{\lambda_g}{\rho_s C_{p,s} \tau_s} \frac{T_f - T_v}{T_v - T_\infty} \quad (4)$$

위 식에서 A 는 상수로 $\sqrt{2}$ (approximate solution) 혹은 $\pi/4$ (exact solution)이며, λ_g 는 가스의 열전도계수, T_f , T_v 및 T_∞ 는 각각 화염온도, 고체연료의 표면온도 및 주위온도를 의미한다.

반면에 고체연료 내로 열전도를 무시할 수 없는 경우(thermally-thick, semi-infinite body)는 가스를 통한 고체연료로의 열전도를 고려해야 하므로 식 (3)의 τ_s 는 열유속과의 상관관계로부터 식 (5)와 같이 정의될 수 있다.

$$\tau_s = \frac{\lambda_s \delta_g (T_v - T_\infty)}{(T_f - T_v)} \quad (5)$$

여기서 λ_s 는 고체연료의 열전도계수이다. 따라서 식 (1)과 식 (5)을 결합하여 식 (3)에 대입하면 최종적으로 화염 전파율을 구할 수 있다.

$$L_{f_thick} = U \frac{\lambda_g \rho_g C_{p,g}}{\lambda_s \rho_s C_{p,s}} \left(\frac{T_f - T_v}{T_v - T_\infty} \right)^2 \quad (6)$$

위 식에서 나타난 바와 같이 고체연료 내로 열전도를 무시할 수 없는 경우는 화염 전파율은 화염영역의 두께, δ_g 와 밀접한 관련을 갖게 되고 δ_g 는 식 (1)에서 나타나 있는 것처럼 외부 공기유속에 영향을 받기 때문에 화염 전파율은 결국 외부 공기유속과 밀접한 관련을 갖게 된다. 그러므로 μG 환경과 같이 부력에 의한 외부 공기유속이 거의 하지 않는 경우 식 (6)의 분모항 $\lambda_s \rho_s C_{p,s}$ 은 고체연료의 열관성과 결부된다. 결국 절연체와 같이 열 관성이 높은 고체 표면에서 정상상태의 화염전파는 쉽게 이루어지지 않을 것으로 예측해 볼 수 있지만 하지만 식 (6)의

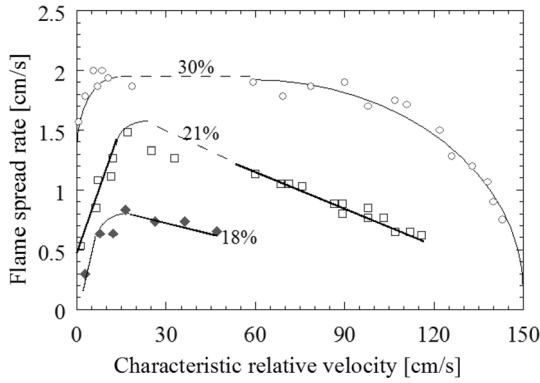


Fig. 10. Measured flame spread rates plotted against characteristic relative velocity for given O₂ concentrations[1].

분자항에 포함되어 있는 가스의 밀도에 대한 의존성 때문에 화염전파속도는 대기 압력과 비례관계가 성립된다. Son 등[22]은 외부 공기유속이 없는 정적환경에서도 고체연료의 열 관성이 작은 Foam을 사용하고 대기 압력을 높이는 방법을 선택함으로써 정상상태의 화염전파가 가능함을 보여주었다. 실제로 압력이 높아지게 되면 CO₂나 H₂O 등과 같이 복사열전달과 밀접한 관련 있는 화학종의 Planck absorption coefficient도 비례해서 증가하기 때문에 이들 화학종에 의한 복사 열유속이 화염전파율에 영향을 미칠 수 있는 상태(optically-thick)에 이르게 된다[16,22]. 따라서 식 (6)에 복사열유속을 고려할 수 있는 항이 추가되어야 하며 관련 연구는 참고문헌[22]에 잘 정리되어 있다.

Fig. 10은 고체연료내로의 열전도를 무시할 수 있는 경우의 대기 중 산소 농도별로 화염 전파속도를 공기유속의 함수로 도시한 그래프이다. 그림에서 보이는 바와 같이 대기 중의 산소량이 증가함에 따라 화염전파속도도 급격하게 증가한다. 앞서 살펴본 것처럼 μ G환경에서 화염주위의 공기유속 증가는 화염의 형상에 직접적으로 영향을 줄 수 있을 뿐만 아니라 국부적으로 원활한 산화제를 공급을 촉진시키므로 화염온도 상승을 통해 화염전파가 증진될 수 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 대기 중 산소량이 21% 이하인 경우는 외부 공기유속이 대략 20 cm/s까지는 화염전파속도도 증가하지만 공기유속이 더 증가함에 따라 감소하여 결국 화염이 소멸된다. 이는 공기유속이 증가하게 되면 대류에 의한 열손실도 부수적으로 커지게 되어서 고체연료의 표면에 전달되는 열유속의 크기 또한 줄어들기 때문으로 판단된다. 반면 대기중 산소량이 30%로 증가하면 식 (4)를 통해서 예측될 수 있는 바와 같이 선실 공기유속의 증가와는 상관없이 화염 전파율이 준정상상태에 이르게 된 후 대류에 의한 열손실이 커지면서 화염이

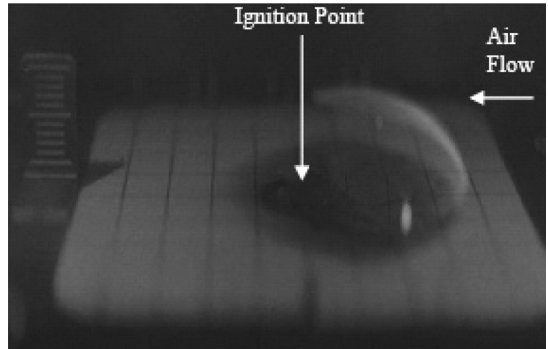


Fig. 11. Flame spread on a plate solid fuel in microgravity: Image taken the reference[23].

소멸되게 된다.

그렇다면 ISS 선실에 공기유속(~ 100 cm/s)이 존재하는 경우 고체연료 표면에 발생된 화염은 μ G 환경에서 어떠한 형태로 전파될까? 대부분은 Fig. 11에서 보이는 것처럼 고체연료 표면에 반구형상으로 생성된 화염의 선단이 공기가 불어오는 방향으로 움직이는 전형적인 대향류(opposed flow)의 모습을 보인다. 액적화염이 이론공연비를 만족시키기 위해서 산소가 풍부한 쪽으로 확장해 나가는 현상과 유사하게 고체연료 표면에 형성된 화염면이 공기가 공급되는 방향으로 이동하게 된다. 이러한 맥락에서 우주정거장에서 화재가 발생할 경우 우선적으로 취해야 할 조치는 환기장치를 정지시켜 선실 내의 공기 순환을 억제하는 일이다.

2.3. 화염소멸

일반적으로 확산화염의 소멸현상은 Fig. 12에 Da-

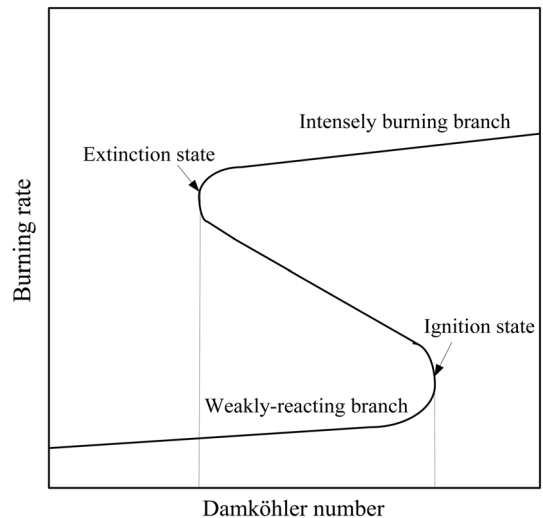


Fig. 12. S-shaped curve representing the relationship between Da and flame temperature (burning rate).

mköhler 수(Da)와 온도(연소율)의 관계로 도시되어 있는 ‘S-곡선’을 통해 보다 쉽게 이해할 수 있다. 일반적으로 확산화염의 소멸현상은 연료와 산화제가 혼합되는 화염면에서 화학반응을 지속시키기 위해 필요한 시간(τ_c)이 충분하지 않을 경우 발생한다. 식 (7)을 통해 알 수 있는 것처럼 τ_c 는 화염온도(T)의 변화, 연료 및 산화제(X_F, X_O)의 증감에 의해 직접적인 영향을 받는다.

$$\tau_c = [X_F X_O A e^{-E/RT}] \quad (7)$$

또한 시스템의 유동의 속도 역시 화학종의 전달현상 및 혼합에 영향을 미칠 수 있으므로 식 (8)에 정의된 유동시간(τ_f) 역시 화염의 소멸현상에 영향을 미칠 수 있다.

$$\tau_f = \frac{L}{U} \text{ or } \frac{L^2}{D} \quad (8)$$

위 식에서 L 은 특성거리, D 는 확산속도이다. 결국 Da 수(= τ_f/τ_c)와 온도(연소율)의 상관관계를 고찰해 봄으로써 위에서 열거된 변수들이 화염 소멸에 영향을 미치는 영향을 파악할 수 있다. 가령 Fig. 12에서 Da 수가 큰 경우 화학반응율이 유체의 혼합율에 비해 빠른 경우로, 급속 화학반응 영역 (Fast-chemistry regime)로 정의할 수 있으며, 반대로 Da 수가 적은 경우 유체의 혼합율이 화학 반응율보다 큰 경우이다. 따라서 Da 가 충분히 적은 구간(그래프의 왼쪽구간)에서는 반응물의 온도가 충분히 높아 연소율이 커지긴 해도 강한 유속(스트레인율, strain rate)으로 인하여 점화가 이루어지지 않는다. μG 환경에서와 같이 부력에 의한 유동의 효과가 줄어들어 상대적으로 Da 수가 커진 경우 연료와 산화제가 적절히 혼합되어 화염이 생성될 수 있는 조건이 형성되면 점화와 동시에 화염의 온도는 순식간에 Upper branch (Intensively burning branch)로 도약할 수 있게 된다. 하지만 안정화된 μG 화염도 화염의 주변의 유속이 Fig. 11에서와 같이 과도하게 증가한다면 연료와 산화제의 공급이 제한되면 Da 수가 작아지면서 화염온도가 Lower branch (Weakly reacting branch)로 떨어지게 되고 화염은 결국 소멸되게 된다. 특히 앞서 언급한 바와 같이 μG 환경에서는 부력에 의한 유동이 사라져 화염의 크기가 커지게 되면 복사열손실을 증가시켜 화염온도를 낮추게 된다. 복사열손실에 의해 낮아진 화염온도는 Fig. 13에서 볼 수 있는 것처럼 연소율을 영향을 미치게 되고 화염면으로 연료 공급을 제한하여 결국 화염을 소멸시키는 역할을 한다.

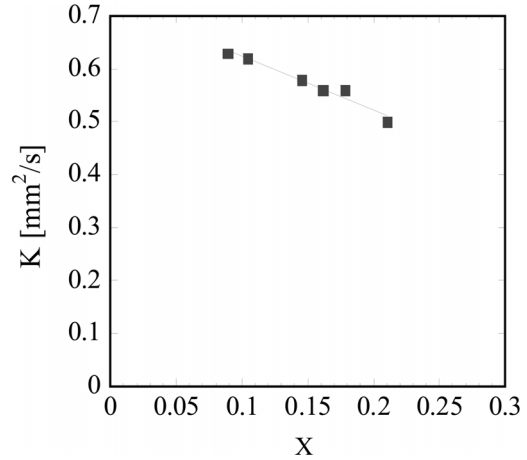


Fig. 13. Droplet burning rate plotted as a function of measured radiative heat loss fraction.

4. 맺음말

우리나라도 우주기술 개발에 박차를 가하기 위하여 우주 관련기술을 국가 중점 육성 분야로 선정하고, 우주개발선진국 10위 안에 진입하기 위해 “국가 우주개발중장기기본계획”을 수립하여 추진하고 있다. 현재 한국항공우주연구원은 국가우주개발정책에 부응하고 2008년 성공적으로 끝난 한국인 우주인 배출사업의 성과를 지속적으로 발전시키기 위해 한국형 유인 우주프로그램 개발사업을 수행하고 있다. 이 프로그램은 국제협력을 통해 우주개발 역량을 강화하고 국제우주정거장의 활용에 능동적으로 참여하여 향후 유인행성탐사에 필요한 기반기술 확보를 그 목표로 하고 있다.

유인행성탐사의 핵심기술 중 하나는 무한한 우주 공간을 탐사함에 있어 한정되고 밀폐된 공간, 즉 선실에 승선한 승무원을 포함한 모든 생명체의 생명을 유지시키고 갑작스럽게 돌발된 위협 상황으로부터 보호하는 하는 것이다. 이런 측면에서 우주환경에서 발생한 화재를 조기에 감지하고 진압할 수 있는 기술의 개발은 유인행성탐사를 위해 선행되어 개발되어야 기술 중 하나라고 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 우주환경을 모사할 수 있는 국제우주정거장에서의 연소실험 및 마이크로중력환경 지상모사 연소실험 결과를 토대로 화염의 점화, 형상, 전파, 소멸 특성을 고찰해 보았다. 앞서 언급한 바와 같이 마이크로중력환경에서는 지구상에서 작용하는 중력의 영향이 거의 사라지기 때문에 지구 중력장에서 중요한 열전달 메카니즘인 대류에 의한 전달 현상이 거의 사라지고 상대적으로 확산에 의한 전달현상이 두드러지게 나타난다. 실제 이러한 물질전달 현상은 우주정거장이나 우주선 가압모듈의 특수한 선실환경(선

실압력, 산도농도, 환기유속 등)과 결합하여 화염의 기본 특성(점화, 형상, 전파, 소멸특성)에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다. 특히 부력에 의한 공기유속의 거의 존재하지 않는 μG 환경에서는 복사열전달 메카니즘이 중요한 역할을 하게 되며, 이로 인해 화염의 전파 및 소멸현상이 크게 영향을 받게 된다. 또한 산소농도의 변화 역시 연소율 및 화염의 형상, 전파와 밀접한 관련을 갖게 되며 μG 환경의 특수한 환경과 결합되어 화재 개연성을 높일 수 있다.

하지만 본 논문에서 다루어진 화염의 형태(화산화염, 예혼합화염), 배열(대항류, 동측류 등), 연료의 형태(액체, 고체, 기체, 혼합연료 등)를 고려해 볼 때 지상의 화염과는 다른 양상을 보일 것으로 예상되는 마이크로중력환경의 화염특성을 완벽히 예측하기는 힘들 것으로 판단된다. 그러므로 마이크로중력환경의 화염특성을 면밀히 살펴보고자 한다면 실제 상황에 맞는 시나리오를 설정하고 이에 부응할 수 있는 화염의 종류, 형상, 연료 등을 선정하여 더 심도 있는 연구를 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] P.D. Ronney, "Understanding Combustion Process through Microgravity Research", Proceeding of Combustion Institute, Vol. 27, pp. 2455-2506 (1998).
- [2] R. Friedman, "Fire Safety in Spacecraft", Fire and Materials, Vol. 20, pp. 235-243 (1996).
- [3] M.Y. Choi and F.L. Dryer, Microgravity Combustion: Fire in Free Fall (H.D. Ross, ed.). Academic Press, Chap. 4, 183-297 (2001).
- [4] NASA, "Living Together in Space: The Design and Operation of the Life Support Systems on the ISS", TM-98-206956, (1998).
- [5] JAXA Human Space Systems and Utilization Program Group, "Kibo Handbook" (2007).
- [6] J.E. Brooker, D.L. Urban, and G.A. Ruff, "ISS Destiny Laboratory Smoke Dection Model", SAE paper 2007-01-3076 (2007).
- [7] K.E. Lange, A.T. Perka, B.E. Duffield, and F.F. Jeng, "Bounding the Spacecraft Atmosphere Design Space for Future Exploration Missions", NASA/CR-2005-213689 (2005).
- [8] C.H. Sohn and Y. Son, "Survey on a Research for Fire Safety in Space with the Understanding of Combustion Characteristics in Microgravity based on NASA's Space Research Program", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 11, No. 3, pp.65-72 (2007).
- [9] O. Fujita, T. Kyono, Y. Kido, H. Ito, and Y. Nakamura, "Ignition of Electrical Wire Insulation with Short-term Excess Electric Current in Microgravity", Proceeding of Combustion Institute, Vol. 33, pp. 2617-2623 (2011).
- [10] A. Yozgatligil, S.H. Park, M.Y. Choi, A. Kazakov, and F.L. Dryer, "Burning and Sooting Behavior of Ethanol Droplet Combustion under Microgravity Condition", Combustion Science and Technology, Vol. 176, pp. 1-15 (2004).
- [11] A. Yozgatligil, S.H. Park, M.Y. Choi, A. Kazakov, and F.L. Dryer, F., "Influence of Oxygen Concentration on the Sooting Behavior of Ethanol Droplet Flames in Microgravity Conditions", Proceeding of Combustion Institute, Vol. 31, pp. 2165-2173 (2007).
- [12] S.H. Park, S.C. Choi, M.Y. Choi, and A. Yozgatligil, "New Observations of Isolated Ethanol Droplet Flames in Microgravity Conditions", Combustion Science and Technology, Vol. 180, pp. 631-651 (2008).
- [13] S.L. Manzello, M.Y. Choi, A. Kazakov, F.L. Dryer, R. Dobashi, and T. Hirano, "Sooting Behavior of Large Droplets in the JAMIC Facility", Proceeding of Combustion Institute, Vol. 28, pp. 1079-1086 (2000).
- [14] A. Kazakov, J. Conley, and F.L. Dryer, "Detailed modeling of an isolated, ethanol droplet combustion under microgravity conditions", Combust and Flame, Vol. 134, 301-314 (2003).
- [15] <http://www.sti.nasa.gov/tto/spinoff1999/ard4.htm>
- [16] S.H. Park and M.Y. Choi, "Formation of Sootshell and Attendant Effects on Droplet Burning Rate and Radiative Heat Transfer in Microgravity Ethanol Droplet Flames", Energy and Fuels, Vol. 23, pp. 4395-4403 (2009).
- [17] S.R. Turns S.R., An Introduction to Combustion, McGraw-Hill (1999).
- [18] W.E. Mell, S.L. Olson, and T. Kashiwagi, "Flame Spread along Free Edges of Thermally Thin Samples in Microgravity", Proceeding of Combustion Institute, Vol. 28, pp. 2843-2849 (2000).
- [19] T. Kashiwagi, K.B. McGrattan, S.L. Olson, O. Fujita, M. Kikuchi, and K. Ito, "Effects of Slow Wind on Localized Radiative Ignition and Transition to Flame Spread in Microgravity", Proceeding of Combustion Institute, Vol. 26, pp. 1345-1352 (1996).

- [20] L. Brahmī, T. Vietoris, S. Rouverau, P. Joulain, L. David, and J.L. Torero, "Microgravity Laminar Diffusion Flame in a Perpendicular Fuel and Oxidizer Streams Configuration", *AIAA Journal*, Vol. 43, No. 8, pp.1725-7733 (2005).
- [21] A. Hamins, M. Bundy, C.B. Oh, and S.C. Kim, "Effect of Buoyancy on the Radiative Extinction Limit of Low-strain-rate Nonpremixed Methane-air Flame", *Combustion and Flame*, Vol. 151, pp. 225-234 (2007).
- [22] Y. Son and P.D. Ronney, "Radiation-Driven Flame Spread over Thermally Thick Fuels in Quiescent Microgravity Environments", *Proceeding of Combustion Institute*, Vol. 29, pp. 2587-2594 (2002).
- [23] G.A. Ruff, M. Hicks, and R. Pettegrew, "Evaluation of CO₂, N₂, and He as Fire Suppression Agents in Microgravity", *NASA/CP-2004-213205/Vol2* (2004).

접수일 : 2012. 11. 08
심사완료일 : 2012. 11. 31