

우주환경에서의 화재안전 개괄: 화염의 점화 및 형상

박설현, 이주희, 김연규, 심은섭

한국항공우주연구원 우주응용·미래기술응용센터

Technical Overview of Fire Safety in Space: Ignition Characteristics and Flame Shape

Seul-Hyun Park, Joo-Hee Lee, Youn-Kyu Kim, Eun-Sup Sim

Korea Aerospace Research Institute (KARI),

Space Application & Future Technology Center

요 약

과학기술의 발전으로 세계 각국의 경쟁은 지상을 넘어 우주로 나아가고 있다. 현재 미국을 비롯한 세계 우주기술 선진국들은 달 및 행성탐사 우주선 개발과 같은 유인 우주기술 개발에 박차를 가하고 있다. 따라서 미국, 러시아, 유럽연합(독일, 프랑스 등 11개국), 캐나다, 일본을 중심으로 운영되고 있는 우주정거장은 유인 우주행성탐사 시 생명체 유지에 필요한 시스템 개발과 검증을 위한 기초/응용과학 실험실로 활용되고 있다. 특히 우주환경에서 화재의 발생과 감지/소화의 메카니즘을 이해하고자 다양한 연소실험이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 가장 기본적인 우주환경인 미세중력환경에서의 화염의 점화 및 형상특성을 고찰해보고 우주환경 화재안전에 관한 일반적인 내용을 기술하였다.

1. 서 론

국제우주정거장(International Space Station, ISS)건설사업은 미국, 러시아, 유럽연합(독일, 프랑스 등 11개국), 캐나다, 일본을 중심으로 1998년 11월부터 건설을 시작하여, 2011년 현재 거의 완성단계에 이른 세계 최초 초대형 국제협력 프로젝트이다. 국제우주정거장 건설에 참여하고 있는 국가는 건설 중은 물론 완공 후 향후 10년 동안 특수한 환경(미세중력, Microgravity)을 활용하여 여러 분야의 기초과학실험은 물론 유인우주 행성탐사 시 생명체 유지에 필요한 시스템 개발과 검증을 위한 궤도 실험실로 활용될 것이다.¹⁾ 지구상에서 중력은 절대적인 힘으로 작용하고 있기 때문에 경우에 따라서 복잡한 물리·화학적 현상을 연구하고자 할 때에는 장애 요소가 되기도 한다. 완전한 무중력환경은 실제 지구 궤도 위성에서는 결코 얻을 수 없는 이상적인 환경이지만 우주정거장의 출현으로 인하여 중력의 영향을 최소화 할 수 있게 되어 미세중력(μG)을 활용한 연구가 중요한 과제로 부

상하게 되었다. μG 은 지구상의 물체에 작용하는 중력의 크기를 1g 라고 정의할 때 10^{-6}g 의 중력크기를 지칭하는 말이지만 10^{-3}g 이하의 중력크기를 통칭하는 용어로 주로 사용되며 reduced gravity나 weightless로 표현하기도 한다.²⁾ μG 조건을 형성하기 위해서는 지구의 중력장에서 멀리 떨어지는 방법 (640만km)이 가장 간단한 방법이지만 현실적으로 쉽지 않은 방법이다. 하지만 지구의 중력장 하에 있다 하더라도 지구중심방향으로 자유낙하를 통해서 최대 10^{-6}g 의 μG 환경을 조성할 수 있으며 우주정거장을 포함한 대부분의 우주실험 설비는 자유낙하를 통하여 μG 환경을 조성하고 있다.

미국을 비롯한 세계 우주기술 선진국들은 유인 달 탐사뿐만 아니라 화성탐사와 같은 우주기술 개발에 박차를 가하고 있다. 유인 우주탐사에 필요한 기술 중 가장 중요한 부분은 오랜 기간 동안 우주에 체류하게 되는 우주인을 포함한 생명체의 건강 및 안전을 어떻게 보장하느냐 일 것이다. 그 중에서도 밀폐된 우주 탐사선에서 발생할 수 있는 화재는 인류가 특히 신경을 써야할 부분 중 하나이다. 우주환경(μG)에서 발생된 화재의 형태는 부력의 효과가 사라짐으로써 지구상에서와는 다른 형태를 띠게 된다. 따라서 우주환경에서 화재를 미연에 예방하기 위해서는 μG 환경에서 화염 점화 및 발생특성을 이해하여야 할 것이다. 이를 위해서 미국의 경우 1960년 말부터 μG 환경을 활용한 연소연구를 통해서 화염특성을 연구하고자 하는 노력을 경주해 오고 있으며 특히 지난 1997년 러시아 우주정거장 미르호에서 발생한 화재를 계기로 우주정거장을 활용한 연소시험이 꾸준히 진행되어 오고 있다. 본 논문에서는 μG 환경에서 화염의 점화현상 및 형상 변화를 액적화염(Droplet flame) 중심으로 고찰해보고 화재와의 연관성을 논의해보고자 한다.

2. 미세중력 화염의 점화 및 형상

2.1 점화에너지

앞서 언급한 바와 같이 우주정거장에서 화재를 예방하기 위해서는 μG 가 화재발생에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 이해가 선행되어야 한다. 실제로 μG 환경에서는 작동 중 가열된 전자(전기)부품의 표면은 열원이 제거되어도 쉽게 냉각되지 않는다. 이는 중력의 영향이 약해짐으로써 부력에 의한 자연대류가 거의 발생하지 않기 때문이다. 따라서 발열이 많은 부품들이 적절한 냉각 과정 없이 오랜 시간동안 작동하다보면 그만큼 화재에 노출되기 쉽다. 가령 우주정거장에서 사용되는 전선의 피복물질인 polyethylene이 가열되어 전선 주위에 가연혼합물이 생성될 경우 μG 에서는 1G에서보다 적은 점화에너지로도 화염이 발생할 수 있다. 또한 지구환경과 비교해 볼 때 점화한계(Ignition limit)가 확장되는 경향이 뚜렷하다. 1G환경에서는 전선 주위의 높은 온도로 인해 가연혼합물의 밀도가 낮아져 발생된 부력(Buoyancy driven flow)에 의해 혼합물가스가 중력의 반대방향, 즉 전선 위쪽으로 이동하게 된다. 하지만 μG 환경에서는 오직 가연혼합물은 농도차에 의한 확산(Momentum driven flow)에 의해 진행되므로 전선주위에 균일하게 분포되어 점화한계가 확장될 수 있으며, 시간이 지나면서 축적된 가연혼합물로 인해 지구환경에 비해 점화 직후 더 강한 연소반응을 일으킬 수 있다.

일반적으로 가연 예혼합물 중심부에서 점화되어 공모양으로 전파되어가는 화염 발생에

필요한 대략적인 최소 점화에너지(Minimum ignition energy, E_{ign})는 식(1)으로 표현될 수 있다.³⁾

$$E_{ign} = 61.6P \left(\frac{C_p}{R_b} \right) \left(\frac{T_b - T_u}{T_b} \right) \left(\frac{\alpha}{S_f} \right)^3 \quad (1)$$

최소점화에너지에 대한 압력(P)의 영향은 식(1)에 직접적으로 나타나있지만 전체적으로는 열확산도(a)와 화염전파속도(S_f)와 관련되어 대략 $E_{ign} \propto P^{-2}$ 의 상관관계를 갖는다. 또한 E_{ign} 는 초기주위온도(T_u)가 높을 수록 작아지는 것으로 알려져있다.³⁾ 따라서 대류에 의한 열손실이 최소화되는 μ G환경에서는 선실내의 압력변화가 최소 점화에너지에 다른 파라미터에 비해 더 많은 영향을 미칠 수 있을 것이다.

2.2 화염형상

미세중력환경에서의 화염은 어떤 모습일까? 간단한 촛불실험을 통해서 쉽게 그 답을 얻을 수 있다. 그림 1에는 각각 1G와 μ G환경에서 생성된 촛불 화염 형상이 도시되어있다. 그림에서 보이는 바와 같이 μ G환경에서는 1G환경과 같은 조건에서 청염의 반구형상 화염이 형성되며 끝부분만 약간의 오렌지색을 띤다. 이는 자연대류의 영향이 거의 사라지고 연료와 산화제가 주로 확산에 의해서 반응영역에 전달되어 화염온도가 낮아져 soot의 발생이 현저히 줄어들었기 때문이다. 또한 낮아진 화염온도로 인해 연소율(Burning rate: 단위시간당 왁스의 소모량) 역시 줄어든다.

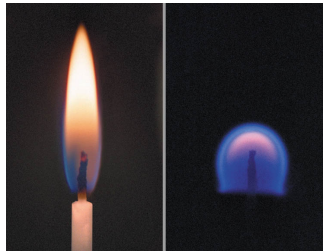


그림 1. 촛불 화염의 모습: 왼쪽 1G 오른쪽 μ G

이미지출처: <http://www.sti.nasa.gov/tto/spinoff1999/ard4.htm>

화재안전 측면에서 보면 이는 낮은 온도와 연소율 때문에 청염의 약한 불꽃이 상당한 시간동안 국지적으로 지속될 수 있고 화염 감지도 그만큼 어려워진다는 것을 의미할 수 있다. 물론 화염 주위에 아무런 유속의 변화가 없는 정적환경(quiescent environment)에서는 화염온도도 낮고 화염전파가 제한되기 때문에 난연물질로 보호되어 있는 우주정거장 선실내로의 화재로는 이어질 가능성이 낮아질 수 있다. 하지만 선실 내에 존재하는 저속의 환기유량과 산소농도가 바뀔 수 환경을 고려해보면 화염전파로 인한 화재의 개연성도 무시할 수 없을 것이다. 선실의 환경(산소농도, 선실압력등)이 화염의 특성에 미치는 영향에 대해서는 μ G환경에서 발생된 액적화염을 통해서 좀 더 자세히 알아볼 수 있다. 실제로 지난 50년 동안 μ G환경에서 발생된 액적화염의 해석을 통해 복잡한 연소현상을 이해하고자 하는 노력이 지속되고 있다. 2011년 현재 미국NASA는 화성 유인 우주탐사 기간 중 발생할지도 모르는 화재현상을 심도 있게 연구하고자 국제우주정거장에서 여러 가지

연소 환경을 고려한 액적화염 소염실험 (Droplet flame extinguishment in microgravity, FLEX)을 실시하고 있다. 그림2는 대기압 하에서 점화된 액적화염의 연소과정을 보여주고 있다.

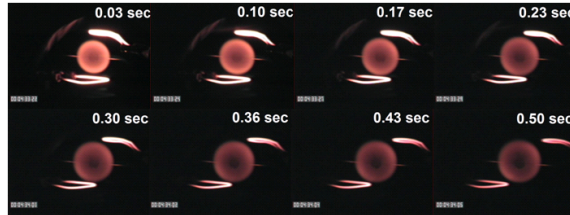


그림 2. 미세중력환경에서 액적 연료의 연소과정

μG 환경에서는 대류현상이 거의 사라지며 확산현상이 대부분 반경방향으로 이루어지므로 그림에서 보이는 것처럼 구형의 화염이 형성된다. 그림3은 대기(선실)의 산소농도가 화염형상에 미치는 영향을 알아보기 위해 대기 중의 산소농도를 늘려 가며 화염의 크기를 측정한 결과를 도시한 그래프이다. 그림에서 y축은 화염크기를 표현하는 무차원수(Flame standoff ratio, 식2 참조)이다. 주어진 조건 모두에서 점화직후 산소농도가 증가함에 따라 화염의 크기는 증가하다가 준정상(qusai-steady)상태에 도달하며 화염크기가 일정한 수준으로 안정화된다. 이는 확산화염의 특성상 화염이 연료와 산화제가 이론당량비로 반응하는 면에 형성되기 때문으로 점화 직후 액적주위에 기화된 연료가 농후하여 산소가 많은 대기 중으로 화염이 전파되는 특성 때문이다. 비슷한 관점에서 산소농도가 증가하면 그만큼 화염이 멀리 확장하지 않아도 될 만큼의 산소가 화염면 주위에 존재하게 되므로 그림3에서 보이는 바와 같이 화염의 크기가 작아지게 된다. 이러한 현상은 식 (2)로 잘 표현되어 있다.

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

$$\text{여기서 } B = \frac{\Delta h_c/v + C_{pg}(T_\infty - T_s)}{h_{fg}}$$

정의된 무차원수로 연료에 따라 그 값이 1-10 인 것으로 알려져 있다.⁴⁾ 결국 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 그림4에서 볼 수 있는 것처럼 연소율 (Burning rate, K: 단위시간당 액적의 소모율) 크게 증가시킬 수 있다. 이는 화염의 온도의 증가로 인해 액적으로 열전도가 증가되어 액체연료의 증발이 촉진되어 일어나는 현상이다. 산소량의 변화는 연소율과 화염크기에 큰 영향을 미치는 반면에 대기압의 변화는 연소율과 화염크기와는 큰 상관관계가 없는 것으로 보고되고 있다.⁵⁾ 이는 압력의 변화가 식(2)에 포함되어 있는 요소들에 큰 영향을 미치지 않을 뿐만 아니라 화염의 온도변화에도 큰 영향을 주지 않기 때문으로 판단된다.

μG 액적화염의 분석결과를 바탕으로 추측해 보면 우주인이 우주 유영 전 잠수병을 예방하기 위해 우주복으로 갈아입는 과정에서 선실의 압력을 감압하고 산소의 농도를 올리

는 과정이 화재의 발생 및 검지에 취약할 것으로 추측해 볼 수 있다. 선실의 압력변화는 화염의 형상 및 연소율에 큰 영향을 미치지 않지만 산소량의 증가는 작고 강렬한 화염을 형성시켜서 국지적으로 가스로부터의 열전도가 증가되어 화재의 발생 가능성이 높아지며, 작은 화염 크기로 인해 초기 화재의 감지에 어려움이 뒤따를 것으로 예상해 볼 수 있기 때문이다.

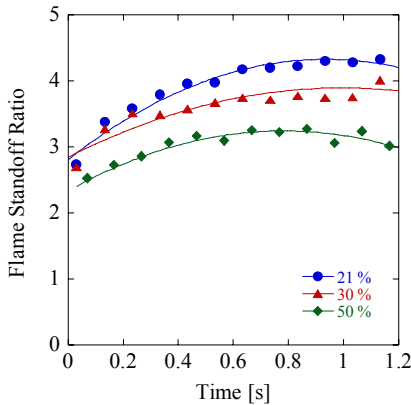


그림 3. 시간별 무차원 화염크기

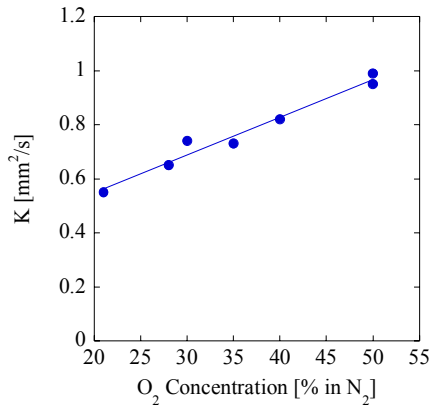


그림 4. 산소농도별 액적 연소율

3. 결 론

우리나라도 우주기술 개발에 박차를 가하기 위하여 우주 관련기술을 국가 중점 육성 분야로 선정하고, 우주개발선진국 10위 안에 진입하기 위해 “국가우주개발중장기기본계획”을 수립하였다. 현재 한국항공우주연구원은 2008년 성공적으로 끝난 한국인 우주인 배출사업을 바탕으로 한국형유인우주프로그램을 운영하고 있으며 국제협력을 통해 우주정거장을 활용한 우주실험을 계획하고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 우주정거장에서는 지구상에서 작용하는 중력의 영향이 거의 사라지기 때문에 지구상에서는 중요한 열전달 메커니즘인 대류에 의한 전달 현상이 약해지고 상대적으로 확산에 의한 전달현상이 두드러지게 된다. 또한 환기장치에 의해 발생하는 우주정거장 선실내의 대기유속은 이러한 물질전달에 현상과 결합하여 화재의 발생 및 전파특성에 큰 영향을 줄 수 있다. 본 논문에서는 우주정거장의 환경특성에 맞는 화염특성을 소개하였다. 미세중력환경에서는 약해진 대류현상으로 인해 적은 점화에너지로도 화염이 발생될 수 있다. 다행히 지상보다는 약한 화염이 발생하지만 우주정거장의 운전 조건에 따라 작고 강한 화염이 발생되어 국부적으로 우주정거장 설비를 파괴할 수 있을 것으로 예상되며 초기 감지에 어려움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한 선실 내에 여러 가지 운전조건과 결합하여 화염전파나 소멸현상이 지상에서와는 다른 양상을 보일 것으로 예상되므로 관련 연구가 더 심도 있게 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 이주희, 김연규, 최기혁 (2005). 유인 우주실험 기술동향, 항공우주산업기술동향 3권 2호 pp.79-91
2. Melissa J. B. Rogers, Gregory L. V, Michael J. W., The Mathematics of Microgravity (1997), NASA EB-1997-02-119-HQ
3. Turns S.R.(1999), An Introduction to Combustion, McGraw-Hill
4. Park S. H., Choi M. Y (2009), Formation of sootshell and attendant effects on radiative heat transfer in microgravity ethanol droplet flames, Energy and Fuels 23(9), pp. 4395-4403.
5. Park S. H. Choi S. C., Choi M. Y. Yozgatligil A. (2008) New observations of isolated ethanol droplet flames in microgravity conditions, Combustion Science and Technology 180 (4), pp. 631-651.