

NASA의 우주 연구 프로그램에 따른 미소 중력하에서의 연소 특성 및 화재 안전 연구 개괄

손채훈* · 손영진**

Survey on a Research for Fire Safety in Space with the Understanding of Combustion Characteristics in Microgravity based on NASA's Space Research Program

Chae Hoon Sohn* · Youngjin Son**

ABSTRACT

Fire is one of important checkpoints in crewed exploration systems, where men inhabit in space. In space, astronaut can't escape from fire out of a spacecraft and not expect any help of fire fighters, either. Accordingly, the best way to stand against fire is to prevent it. But, when fire occurs in space, flame behaviors are quite different from those observed on earth because of micro- or zero-gravity in space. The present paper introduces major research results on flame behaviors under microgravity and fire prevention, detection, and suppression in crewed exploration spacecrafts and international space station based on NASA's FPDS research program.

초 록

화재는 인류가 우주 여행을 하거나 우주에서 체류하고자 할 경우, 특히 조심해서 신경을 써야 할 부분이다. 지구상에서와는 달리, 우주에서는 화재를 피하여 외부로 도망을 칠 수도 없고, 진화를 위해 소방서에 도움을 요청할 수도 없다. 따라서 최선책은 화재를 미연에 방지하는 것이 될 것이다. 그러나, 우주에서는 화재가 발생하였을 때, 그 화염의 행태가 지구상에서와는 다른 양상을 띄게 된다. 그 이유는, 지구상에 있는 모든 물질에 작용하는 중력이 우주에서는 없거나 작기 때문이다. 본 논문에서는 미소 중력하에서의 화염의 행태에 대하여 중요한 부분의 연구 결과를 소개하고, 이에 근거하여 유인 우주 탐사선과 우주 정거장 등에서 화염을 방지, 감지, 진화하는 연구에 대하여 미국 NASA의 FPDS 프로그램을 바탕으로 하여 소개하였다.

Key Words: Crewed Exploration Spacecraft(유인 우주 탐사선), International Space Station(우주 정거장), Fire(화재), Microgravity(미소중력), Fire Suppression(화재 진화)

* 정회원, 세종대학교 기계항공우주공학부

** 정회원, 현대자동차 환경기술연구소 연료전지개발팀
연락처, E-mail: chsohn@sejong.ac.kr

1. 서 론

인류가 동물과 차별화되어 만물의 영장으로 군림할 수 있도록 해 준 중요한 도구 중의 하나로서 불을 들 수 있다. 인류의 역사와 궤를 같이 한 연소에 대한 연구는 그 역사가 가장 긴 학문 중의 하나이다. 인류는 지구상에서 발생하는 화재를 예방하고, 초기에 감지하고 이를 진화함으로써 피해를 최소화하려는 노력을 경주해 왔다. 20세기 들어 인류는 달 탐사를 성공하였으며, 우주 정거장을 건설하여 실험을 수행하고 있다. 부시 정부는 NASA의 장기 비전으로서 달에 사람을 보내는 프로젝트 및 화성 탐사 계획을 발표하였다. 이에 지구의 중력과는 다른, 부분 중력이나 미소 중력 하에서 화재의 위험성을 미연에 방지하거나 혹은 조기에 감지하여 진화하는 기술이 인류의 우주 여행의 성공 여부에 있어서 가장 중요한 부분으로 대두되고 있다.

2004년 1월 14일, 미국의 부시 대통령은 우주 여행에 대한 비전을 제시하였다. 이는 인류를 달에 다시 보내는 것과 화성에 유인 탐사선을 보내는 것을 주요 내용으로 하고 있다. 이를 달성하기 위하여 어마어마한 양의 연구와 노력이 필요할 것이며, 이는 현재 우주정거장과 우주왕복선으로부터 얻어진 우주에서의 생활 및 우주에서 인간의 건강 유지에 관한 지식 및 기술들을 기반으로 하여 훨씬 더 진보된 기술을 요구할 것이다. 그 중에서도 중요한 부분으로는 오랜 기간 우주에 머물게 될 우주인의 건강 및 안전을 어떻게 보장할 수 있느냐 하는 것이다. 본 논문에서 다루고자 하는 미소 중력하에서의 화재에 관한 연구는 우주인의 안전을 보장하기 위해 반드시 확보해야 하는 기술이며, 이를 세 가지 분야로 나누어 살펴보기로 한다. 그 세 가지는 FPDS로서 각각 Fire Prevention(화재 예방), Detection(감지), and Suppression(진화)을 일컫는다.

본 논문에서는 미소 중력하에서의 연소 현상이 지구상에서와 다른 형태를 보이는 것에 대하여 간략히 소개하고자 한다. 또한, 앞에서 언급

한 세 가지 과제와 관련한 기술을 정의하고, 그 방법론을 정립함으로써 화재 방지와 재료의 발화성, 화재 신호 및 감지, 진화 등의 분야에서 어떠한 연구가 진행되어야 하는가에 대하여 소개하고자 한다. 각 분야에서 언급되는 생산물 혹은 전달물(deliverables)들은 향후 우주 탐사선 혹은 우주 정거장 등에서 필요한 물건으로 정의된다. 이러한 연구를 하기 위해서는 연소, 화재 안전, 위험 진단, 장애 분석 등을 연구하는 학문들을 총망라하여 함께 연구를 진행하여야 한다. 한편, 이러한 전달물에는 하드웨어, 설계 인자, 데이터 수집 방법, 시험법 등이 포함될 수 있을 것으로 생각된다.

앞서 언급한 바와 같이 우주에는 지구상에 있는 모든 물질에 작용하는 중력이 없거나 작기 때문에, 지구상에서 가장 중요한 열전달 메커니즘인 대류의 영향이 없거나 미미하다. 따라서 미소 중력하에서는 유체의 유동, 물질 전달, 열전달 등이 지구상에서와는 다른 양상을 보이며, 이에 따라 미소 중력하에서의 화염 역시 다른 양상을 보이게 되는데 이에 대하여 많은 연구가 행해져 왔다[1-5]. 본 논문에서는 이러한 미소 중력하에서의 화염에 관한 연구를 인류가 안전하게 우주를 여행할 수 있도록 응용하는 것[1]에 대하여 간략히 소개하고자 한다.

2. 미소 중력하에서의 화염 연구

2.1 기본 화염 특성

연소에 의해 생성되는 기연가스는 대부분 고온이기 때문에 밀도가 낮아 부력을 받게 되어 연소 생성물은 중력의 반대방향으로 움직이는 유속을 갖게 된다. 따라서, 중력조건하에서는 열에너지와 반응물의 전달율(transport rate)이 부력에 의한 대류현상에 의해 큰 영향을 받는다. 굉장히 고속의 제트에 의해 형성되는 난류화염에서조차 중력하에서와 미소 중력하에서 서로 다른 거동을 보일 수 있다. 예를 들어, 로켓 노즐 출구에서 형성되는 거대한 부력 플룸(plume)은 화염저부 근처의 유동에 영향을 미쳐 결국

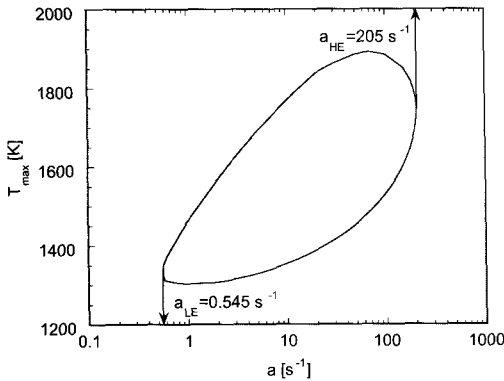


Fig. 1 Flame-temperature response curve with respect to strain rate, a

화염의 특성을 변화시킬 수 있다[6].

또다른 주목할 만한 사실은, 미소 중력하에서는 화염의 복사 열전달이 중요해진다는 것이다. 이로 인해, 미소중력하에서 형성되는 대부분의 화염은 두 개의 소멸 한계를 갖게 된다. 하나는 기존 중력조건하에서도 관찰되는 높은 스트레치에 의한 소멸(transport-induced extinction)이고, 다른 하나는 낮은 스트레치에서 두꺼운(거대한) 화염으로부터 주위로의 복사열손실 증대로 인한 소멸(radiation-induced extinction)이다[7]. Fig. 1에 저자(손채훈)가 메탄/공기 대향류 기체상 화염에 대해 계산한 소멸 계산 결과를 나타내었다. 앞에서 언급하였듯이, 높은 스트레인 율(strain rate)에서의 소멸점(a_{HE})과 더불어 낮은 스트레인 율에서의 소멸점(a_{LE})을 관찰할 수 있다.

2.2 연구의 성격과 간략한 역사

미소중력 연구를 위해서는 중력을 제거하거나 최소화해야 하기 때문에 실험에 어려움이 따른다. 지구상에서 이러한 미소중력 환경을 조성하기 위해서는 drop tower에서 실험대상물을 자유낙하시키거나 포물선 궤적으로 비행하는 항공기 내에서 실험을 해야 한다. 또는, 저궤도 과학로켓을 이용하거나 우주선을 이용하는 방법도 있다. 그러나, 비용이 상당하기 때문에 통상 여러 전문가들의 의견 수렴을 거쳐 실험 수행 여부가 결정된다. 이에 반해서 수치해석적으로 미소 중

력에 대한 연구를 수행하는 것은, 지배방정식에서 중력항을 제거하기만 하면 되기 때문에 전혀 어려움이 없다.

미국의 경우 1960년대 말에 아주 제한적인 미소중력 연소 연구 프로그램이 시작되었고, 유인 우주선 개발에 따라 화재 안전에 대한 관심이 증가하게 되었다[8]. 1990년 이전에는 매년 10개 미만의 미소중력 연소 프로그램이 NASA의 지원을 받았으나, 1990년부터 대규모 지원에 따라 1998년에는 67개의 단위 연구가 수행되기도 하였으며, 그중 14개가 우주공간에서의 연구에 해당하였다. 그러나, 2000년 중반에 들어서는 대부분의 연구가 중단되어 겨우 명맥만 유지하고 있는 실정이다.

3. 우주선에서의 화재 안전 연구

이 장의 내용은 주로 참고문헌 [1]의 내용을 토대로 작성되었음을 밝혀둔다.

3.1 우주선의 화재안전 시스템과 절차의 현 기술상태

현재 우주정거장과 우주 왕복선에 적용되고 있는 화재 관련 안전 시스템을 검토하는 것이 차세대 화재 안전 시스템을 구축하는 데 첫 번째 작업이 될 것이다. 비록 본 논문에서 소개할 차세대 화재 관련 시스템이 현재의 우주 정거장이나 우주 왕복선에 적용될 것은 아니지만, 어떤 식으로든 관련이 있을 것이며, 영향을 줄 것이기 때문에 검토할 가치가 있다고 하겠다.

3.1.1 화재 방지 및 재료의 가연성

현재 어떤 재료를 우주선 혹은 우주 정거장의 어떤 부분에 적용하기 위해서는 재료의 가연성 시험을 거쳐서 그 적합성을 판명하는데, 이는 초기 유인 우주선을 개발하던 시기 이후로 거의 개정이 없었다. 미소 중력하에서 사용하기 위한 재료의 적합성 판명 기준은 화재 위험성의 정량화를 통해서라기보다는 현상적인 결과를 통해 만들어졌다. 현재, 재료의 가연성 특성화를 통해서 재료의 사용 적합성 여부를 판명하는 기준은

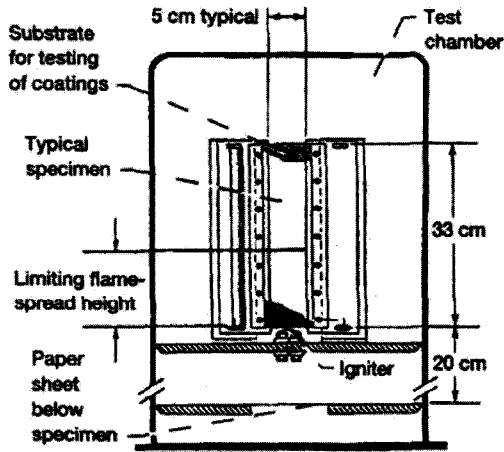


Fig. 2 Experimental configuration for the upward flame propagation test (A chemical igniter is used if the O_2 mole fraction is less than 50 %. Otherwise, a silicone igniter is used.) [1]

NASA-STD-6001이다[9]. 이는 재료의 가연성, 냄새, 유해가스 배출, 사용 기준, 시험 방법 등에 대하여 기술하고 있다.

Figure 2에 나타내었듯이, 이 실험은 재료를 지구 중력하에서 최악의 주변 환경하에 놓고 아랫부분을 점화시켜 화염이 윗 방향으로 진행하도록 고안된 것이다. 5 cm 폭에 33 cm 길이의 시편을 그림과 같이 설치한 후, 실험을 수행한다. 하지만, 앞서 언급한 바와 같이 이 실험 결과는 미소 중력 혹은 부분 중력하에서 일어나는 현상에 대하여 정량적으로 예측하지 못하는 단점이 있다. 또다른 실험 방법으로는 기준 산소 소비cone-calorimeter를 사용하여 점화 지연 시간 및 재료의 연소율을 측정하는데, 이 또한 지구 중력에 의한 부력의 영향이 지배적이어서 우주에서 발생할 수 있는 경우를 정량화하는데 어려움이 있다.

3.1.2 화재 감지

우주선에서 화재를 감지하는 방법에 대해서는 미국과 러시아 간에 최적의 시스템에 대한 의견이 분분한 상태이다. 우주 왕복선과 우주 정거장의 러시아 모듈에서는 이온화 스모크 센서를 사

용하는 반면에, 미국 모듈에서는 광전자 스모크 센서가 사용된다. 그런데, STS-75(우주왕복선)에서 시험한 CSD(Comparative Soot Diagnostic) 실험의 결과 중에서, 액체 스모크 에어로젤에 대한 스모크 센서의 성능이 미소 중력하에서 현저히 줄어드는 것으로 밝혀졌다. 이는 미소 중력하에서 체류(residence) 시간이 지구 중력하의 경우에 비하여 늘어남에 따라 액체 스모크 입자들이 비정상적으로 커지기 때문으로 생각된다. 이러한 결과들을 고려하여 향후의 우주 탐사선 등에 사용되어질 스모크 센서가 설계되어야만 할 것으로 생각된다.

3.1.3 화재 진화

현재의 우주선은 하론(Halon)을 기반으로 한 소화기 및 소화 시스템을 채용하고 있으며, 우주 정거장의 US 모듈에서는 이산화탄소를 사용한 소화기를, 러시아 모듈에서는 물을 이용한 소화기를 채택하고 있다. 그러나, 참고문헌 [9-11] 등의 논문에서 볼 수 있듯이, 이산화탄소나 물을 이용한 소화기가 얼마나 효율적인지는 더 많은 연구가 필요하다.

3.2 몇 가지 가정들

안전한 우주 여행을 위해 필수적으로 갖추어야 할 조건으로 다음 두 가지 가정이 선행되어야 한다. (1) 우주 여행들에 대한 상세한 일정 및 목적이 정의되어야 하며, (2) 발생할 수 있는 화재에 대한 가설이 정립되어야 한다. 이러한 전제가 없이는 우주선에서 일어날 수 있는 화재를 다루기에는 그 범위가 너무 커서 연구를 집중할 수 없게 될 것이다. 현재의 기술 수준을 바탕으로 일어날 수 있는 화재들에 대하여 여러 가지 가설을 세우고, 그에 따른 연구를 진행하여야 할 것이다.

3.3 FPDS 관련

앞서 언급한 대로 FPDS(Fire Prevention, Detection, and Suppression), 즉, 화재 방지, 감지, 진화는 각각이 따로 연구되어야 하며, 또한

그 결과를 총체적으로 연결시켜야 한다. 화재를 예방하는 것이 가장 중요한 과제이며, 이는 우주에서 발생할 수 있는 화재의 종류와 그 특성을 알아야 가능할 것이다. 또한 화재의 발생시 지구 상에서 현재 사용하고 있는 센서로는 감지하지 못할 수 있으므로, 미소 중력하에서 스모크를 감지할 수 있는 센서의 개발 또한 중요하다. 마지막으로 화재가 발생하였을 경우, 우주선에 있는 승무원들에게 영향을 미치지 않으면서 진화를 어떻게 할 것인지에 대하여 연구가 진행되어야 할 것이다.

3.3.1 화재 방지 및 물질의 가연성

(1) 지구 중력하에서의 물질의 가연성 실험에 의한 미소 중력하에서의 가연성 평가

현재 우주에서 사용할 물질의 타당성 여부 시험은 초기 우주 여행시 행해진 시험 방법이 거의 바뀌지 않은 채 사용되고 있다. 게다가 시험에서 사용되는 판단 기준은 정량적인 방법보다는 화재가 발생하는 현상을 기초로 하여 정해졌다. 몇몇 미소 중력하에서의 고체 연료의 가연성 실험 결과는 지구 중력하에서보다 미소 중력하에서 화염이 더 잘 일어나고 더 빨리 전파될 수 있음을 보여주고 있다. 미소 중력하에서 낮은 특성 상대 속도 영역에서 또하나의 연소 한계점을

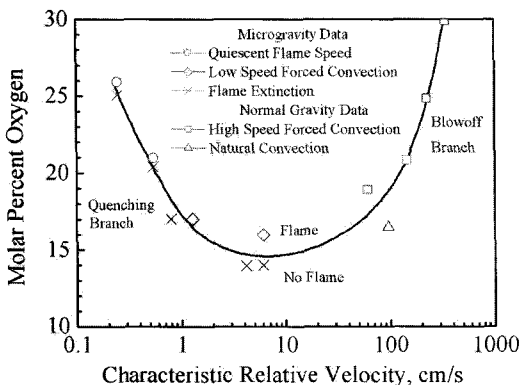


Fig. 3 Flame extinction limits of solid fuel as an oxygen mole percent for different gravity conditions [10] (characteristic relative velocity = flame spread rate - inflow velocity)

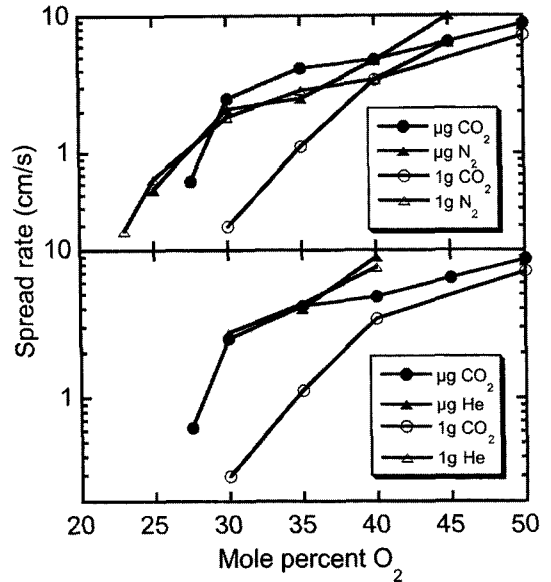


Fig. 4 Effects of oxygen concentration on flame spread rates over thick solid fuel beds at μg and at 1g (polyphenolic foam, density = 0.0267 g/cm^3 , 4 atm total pressure) (Top) Comparison of O_2/N_2 and O_2/CO_2 mixtures; (bottom) comparison of O_2/He [13]

보이거나[10], 혹은 미소 중력하에서의 화염전파속도가 지구 중력하에서의 화염속도보다 빠른 경우를 실험으로 보여주고 있다[13]. Fig. 3은 미소 중력하에서 이중(double) 연소 한계가 존재함을 보여주는 실험 결과를 나타내며, Fig. 4는 저자(손영진)가 중력 조건에 따른 화염전파속도(flame spread rate) 변화에 대해 실험한 결과의 한 가지 예를 보여준다.

이러한 연구 결과들을 볼 때, 우주에서 일어날 수 있는 화재 및 그 결과에 대한 기존의 가설을 보다 심도있게 재검토하고 미소중력하에서 발생할 수 있는 시나리오들에 대하여 좀 더 진보된 실험 방법을 정립해야 한다. 그러므로써 지구 중력하에서 실험한 결과를 가지고 좀 더 정확하게 미소 중력하에서의 물질(고체 연료)의 가연성을 예측할 수 있으며, 이는 우주 여행에서 일어날 수 있는 화재를 다루는 데 중요하다.

(2) 우주 여행에 사용될 후보 대기와 물질의 가연성 관계 정립

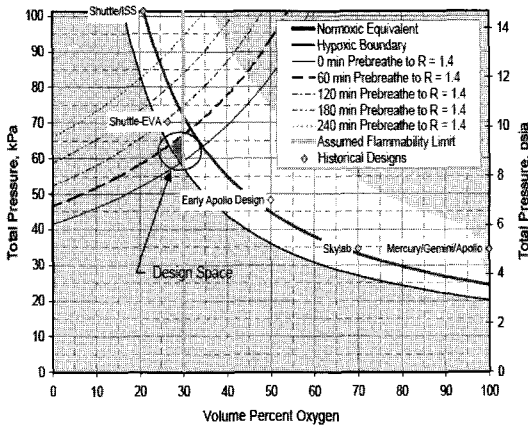


Fig. 5 Design space for cabin atmosphere and pressure and O_2 concentration. Space suit pressure is 29.6 kPa (4.3 psia); R is the bends (tissue) ratio. At a bends (tissue) ratio of $R = 1.4$, 4.5 % of the population will experience symptoms of decompression sickness [14]

우주 여행을 위한 우주선의 설계 및 여행 계획을 짜는 데 있어서 가장 중요하고 다른 모든 설계에 영향을 미치는 설계 인자로는 우주선 내부의 대기 압력과 그 조성을 들 수 있다. 이제까지 사용된 대기조건으로 Mercury, Gemini, Apollo 우주선에서는 100% O_2 , 34.5 kPa의 대기를 사용하였고, ISS(우주정거장) 및 STS(우주 왕복선)에서는 21% O_2 /79% N_2 , 1 atm의 대기를 사용하였다.

Figure 5에 우주 승무원이 견딜 수 있는 대기 압력 및 산소 농도의 조건에 따른 설계 곡선을 나타내었다. 이는 생물학자들이 실험에 의한 결과를 바탕으로 만들어 낸 것이다[14]. 그림에서 처럼 인간의 생명리듬을 위한 산소 부분압력을 유지하기 위해서 산소 농도는 총압력이 감소함에 따라 증가하여야 한다. 반면에 재료의 가연성은 산소의 물분율이 증가함에 따라 증가하므로, 대기의 압력을 줄이면 산소의 농도가 높아져서 화재가 일어날 가능성이 커지게 된다.

기존의 우주선에 사용되었던 대기의 범위로 미루어 볼 때, 최적의 대기조건이란 존재하지 않으며, 각각의 목적에 맞도록 우주선의 대기를 정

하는 것이 중요하다. 하지만, 여러 가지 실험과 경험으로 미루어 볼 때, 우주선 내부의 대기는 1 기압보다 작게 하는 것이 여러 모로 유리함을 알 수 있다. 산소 물분율이 30% 이하에서는 다양한 물질들이 우주선에서 사용될 수 있으며, 기존의 시험 조건을 통과할 것이다. 그러나, 예를 들어 화성 탐사를 할 경우에는, 우주선의 대기압을 낮추는 것이 연료를 절약할 수 있고, 우주선의 구조물을 좀 더 자유롭게 설계할 수 있는 등의 잇점이 있으므로 낮은 대기압과 그에 수반되는 높은 산소 물분율에서 사용될 수 있는 물질들의 선택 및 시험이 매우 중요하다고 하겠다.

(3) 우주선과 우주 여행시 생명체에 대하여 발생 가능한 실제 화재 시나리오의 정의

화재 방지 공학은 STS나 ISS에 대한 구체적인 사상이 정해진 후에 화재와 관련한 영역에서 상당한 진전을 이루어냈다. 이는 화재의 발생 및 전파 메커니즘을 잘 이해하고 분석했을 뿐만 아니라, 화재가 발생하였을 때 어떻게 진행될 지에 대하여 컴퓨터를 이용한 계산을 수행하는 것이 보다 더 용이해졌기 때문이다. 이러한 기법들은, 지구상에서 및 우주 왕복선 등에서 사용될 물질의 가연성 기준을 정하는 것에서부터 발생할 수 있는 화재에 대한 감지, 진화 시스템 설계에 이르기까지 응용될 수 있다. 그러나 이렇게 진보된 기법들도 미소중력하에서 일어날 수 있는 화재에 대해서는 바로 적용되지는 못하고 있다. 이 기법들을 앞서 언급했던 미소 중력하에서의 고체 연료의 화염 전파 속도(spread rate), 연소 한계 산소 농도 등에 대한 연구 결과와 접목시킴으로써 우주에서 발생할 수 있는 다양한 화재 시나리오를 만들어 낼 수 있으며, 설계 및 운전 조건을 정할 때 사용될 수 있는 실제적인 정보를 얻을 수 있다. 적어도 이러한 시도는 미소 중력하에서 화재 발생시 일어날 수 있는 시나리오를 정의하기 위해서 어떠한 정보를 축적해야 하는지 및 얻어진 데이터를 축적하는 이론적인 방법론을 제공할 것이다.

3.3.2 화재 신호와 감지

(1) 가스 및 입자상 형태의 pre-fire 화재시의 신호를 감지하는 진보된 시스템

ISS에서 사용된 스모크 센서는 먼지에도 지나치게 민감하여 많은 잘못된 경고를 하였다. 이는 새로운 방식의 스모크 센서가 미소 중력하에서 필요하다는 것을 암시하는 것으로써 장기적으로 우주를 여행하는 경우에는 더욱 더 절실하며 당면한 과제로 대두되고 있다. 스모크 센서가 갖추어야 할 조건으로는 (i) 최소한의 잘못된 경고 및 화재의 감지, (ii) pyrolysis 등의 감지에서부터 경고음 발생까지의 시간 최소화, (iii) 승무원에게 화재 발생 위치 신속 전달, (iv) 감지된 신호로부터 화재 원인 파악 등이 있다.

(2) 우주선 내부에서 스모크, 재, 연소 가스 등의 이동을 설명할 수 있는 검증된 모델

우주선 등의 내부에서 화재가 발생시 화염이 어떻게 전파되고, 재, 그을음 등이 어떻게 움직이는지를 예측하지 못하면 센서 역시 그 기능이 감소될 수밖에 없으므로, 이에 대한 검증된 컴퓨터 모델의 개발이 센서의 개발과 함께 진행되어야 한다.

3.3.3 화재 진화

(1) 화재 진화 시스템의 설계법 - 소화제의 효율성, 요구되는 농도, 분사 방법

현재 ISS에서는 지구상에서 사용되고 있는 이산화탄소가 휴대용 소화기의 소화제로 사용되고 있다. 현재 NASA 및 여러 연구기관에서 연구되고 있는 소화제로는 이산화탄소, 질소, 헬륨, 물 입자(water mist), micro-encapsulated water 등이 있다.

(2) 화재 및 화재시의 승무원의 반응에 대한 시뮬레이션 및 승무원 훈련

효과적인 화재 방지 및 진화 시스템 못지 않게 승무원의 훈련은 중요하다. 이에 따라 가상적인 화재 상황을 만들어 그에 대처할 수 있도록 승무원을 훈련시킬 수 있는 시뮬레이션 훈련 프로그램을 개발하여야 한다.

본 특집논문에서는 미소 중력하에서의 화염 거동의 특징과 화재 안전에 대한 연구 결과를 간략히 소개하였다. 미소 중력하에서는 지구 중력하에서와는 다른 양상을 보이는데, 이는 대류의 영향이 거의 없어지거나 작아지기 때문이다. 이에 대해 이해하는 것이 우주선 등의 설계에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 왜냐하면 인간을 우주에 보냄에 있어서 무엇보다 중요한 것이 안전이며, 화재는 안전한 우주 여행을 하기 위한 가장 기본적으로 해결해야 하는 항목이기 때문이다.

NASA에서는 인간의 달 채탐사 및 화성 탐사라는 목적을 달성하기 위하여 화재와 관련한 사항을 다음의 세 가지로 정의하였다. 화재 방지, 화재 감지 및 진화가 그것이다. 이에 대한 연구 성과를 통해 미소 중력하에서 화재와 관련한 안전을 보장하고 성공적인 우주 여행을 해낼 수 있을 것이다. 이를 위해 과학자들에게 던져진 과제는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (i) 물질의 가연성을 지구 중력하에서 실험하고 그 결과를 어떻게 미소 중력하에서의 유용한 결과로 사용할 수 있는지에 대한 연구
- (ii) 우주선 내부에서 화염 및 오염 물질들의 진화에 대한 모델링 확립
- (iii) 좀더 진보된 스모크 감지 센서 및 화재 신호의 정량화에 대한 연구
- (iv) 미소 중력하에서 일어날 수 있는 화재에 대한 시나리오 구축 및 시뮬레이션을 통한 모든 가능성 확보
- (v) 좀더 효과적인 소화제 및 화염에 도포하는 방법에 대한 연구

한편, 여전히 우주 개발 부문에 있어 후발국인 우리나라로서는 아직 미소 중력하에서의 연구가 초기 단계에 있으며, 더구나 우주선내 화재 안전에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 현재 산발적으로 진행중인 미소 중력하에서의 화염 연구는 궁극적으로 우주선내에서의 '화재'와 관련된 문제로 이어질 수 있다. 우리나라에서 언젠가 유인 우주선을 발사하게 될 때, 선진국의 과학기술자들이 직면한 같은 문제, 즉 화재 안전에 대

4. 요약 및 결론

한 문제로 고민하게 될 지도 모른다. 따라서, 장기적인 안목과 국가우주개발 계획에 따라 적절한 시기에 우주선내 화재 안전에 대한 연구를 진행하거나 데이터를 확보하는 것이 바람직할 것이다.

참 고 문 헌

1. Ruff, G. A., Urban, D. L., and King, M. K., "A Research Plan for Fire Prevention, Detection, and Suppression in Crewed Exploration Systems," AIAA paper 2005-0341, 2005
2. Sacksteder, K. R., "The Implications of Experimentally Controlled Gravitational Accelerations for Combustion Science," 23rd International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1990, pp.1589-1597
3. Law, C. K. and Faeth, G. M., "Opportunities and challenges of combustion in microgravity," Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 20, 1994, pp. 65-113
4. NASA TM-106858, Microgravity Combustion Science: 1995 Program Update, 1995
5. Nomura, H., Ujue, Y., Rath, H. J., Sato, J., and Kono, M. "Experimental Study on High Pressure Droplet Evaporation Using Microgravity Conditions," 26th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1996, pp.1267-1273
6. Ronney, P. D., "A Perspective on the Role of Microgravity in Combustion Research," Combustion and Flame, Vol. 116, 1999, pp. 317-318
7. Sohn, C. H., Kim, J. S., Chung, S. H., and Maruta, K., "Nonlinear Evolution of Diffusion Flame Oscillations Triggered by Radiative Heat Loss," Combustion and Flame, Vol. 123, 2000, pp.95-106
8. Urban, D. L. and King, M. K., "NASA's Microgravity Combustion Research Program: Past and Future," Combustion and Flame, Vol. 116, 1999, pp.319-320
9. National Aeronautics and Space Administration Technical Standard 6001, Flammability, Odor, Offgassing, and Compatibility Requirements and Test Procedures for Materials in Environments That Support Combustion, 1998
10. Olson, S. L. "Mechanisms of Microgravity Flame Spread Over a Thin Solid Fuel: Oxygen and Opposed Flow Effects," Combustion Science and Technology, Vol. 76, 1991, pp.233-249
11. Mcgrattan, K. B., Kashiwagi, T., Baum, H. R., and Olson, S. L., "Effects of Ignition and Wind on the Transition to Flame Spread in a Microgravity Environment," Combustion and Flame, Vol. 106, 1996, pp. 377-391
12. Prasad, K., Olson, S. L., Nakamura, Y., and Kashiwagi, T., "Effect of Wind Velocity on Flame Spread in Microgravity," 29th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 2002, pp. 2553-2560
13. Son, Y. and Ronney, P. D., "Radiation-Driven Flame Spread over Thermally Thick Fuels in Quiescent Microgravity Environments," 29th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 2002, pp. 2587-2594
14. Lange, K. E., Duffield, B. E., Jeng, F. F., and Campbell, P. D., "Exploration Spacecraft and Space Suit Internal Atmosphere Pressure and Composition," 2005 Bioastronautics Investigators' Workshop, Galveston, Texas, January 2005