

우주선에서의 화재 안전

우주선에서의 화재 예방, 감지, 소화에 대한 요구사항은 지상 및 항공기 시스템에서 확립된 것에 기초하고 있다. 그러나 궤도상 우주선의 무중력 환경에서는 지상환경에서 대개 위쪽으로 작용하는 부력이 거의 존재하지 않는다. 이러한 특징은 화재 특성과 화재 안전 전략 수립에 큰 영향을 미친다. 본고는 우주선 화재 안전 기술에 관련된 무중력 연소에 대한 연구 결과를 검토한다.

1. 개요

우주선 캐빈은 소화설비를 위한 공간이 작고 궤도상에 있는 동안 탈출 수단이 없는 한정된 공간이다. 화재 발생은 매우 낮은 확률이지만, 발생하면 우주선과 승무원에게 심각한 위협을 줄 수 있다. 미국의 유인 우주선에서는 화재가 발생한 적이 없지만, 전기합선 혹은 부품의 과열로 최소한 다섯번의 작은 사고가 셔틀 임무 수행 중에 보고되었다. 승무원들은 이러한 잠재 화재 전조에 재빨리 대응하여 관련회로 혹은 부품을 차단시켜 위협에서 벗어날 수 있었다.

우주선에서 확실하게 화재 안전을 확보하지 못하는 주요한 이유는 무중력 혹은 저중력 상태인 궤도상의 우주선에서 발생하는 초기 화재의 특이한 특징을 잘 이해하지 못하는 데서 비롯된다.

본고는 우주선의 소화설비 설계와 운영에 대한 본 정보의 적용에 대하여 설명하고, 특히 셔틀과 국제 우주 정거장에 대한 화재 안전 기술의 예를 설명한다.

2. 우주 환경과 화재 안전 연구

대개 화재는 화염에서 고온에 의해서 창출된 큰 밀도 기울기를 가진다. 지상에서는 중력 때문에 이러한 밀도 기울기는 위쪽으로 부력 흐름을 발생시킨다. 궤도상의 우주선은 반대로 원심력과 중력의 균형으로 거의 평형상태에 있게 된다. 잔류 중력 가속도가 무척 낮다. (지구 해면 기준 $9.8m/s^2$ 보다 대략 10^{-4} 정도로 낮다.) 매우 큰 밀도 기울기가 존재해도 부력과 흐름은 무중력상태에서는 거의 무시된다. 따라서 결국 열과 질량 이동속도, 발화, 인화성, 화재 특성, 화염 전파 속도는 지상 화재에서 일어나는 상황과는 상당히 다르게 된다.

무중력에서 연소 과정의 연구는 최근에 상당히 발전되었는데 궤도상 화재 안전 문제를 해결하기 위한 필요성에 의해서 또한, 단순화된 비-대류 시스템의 분석을 통하여 과학적 지식을 향상시킬 목적에서 연구하게 되었다. 그러나 유용한 우주선 화재 안전 기술과 시행을 위해서 발전하고 있는 무중력 연소 과학을 적용하는 것은 다소 어려운 것으로 밝혀졌다. 더욱이 우주선에서 화재 예방, 감지, 소화 기능은 무중력에서 특수한 속성의 화재에 최적으로 대응할 필요성은 있으나 우주선의 공간, 질량, 동력 및 자금의 한계에 의해서 제한되고 있다.

우주선 그 자체는 중력상태에서 화재 거동과 연소에 대한 실제 모델 실험과 연구를 위한 이상적인 실험실이다. 실제로 셔틀과 이전의 미 우주정류장인 스카이랩은 중요한 연소 실험을 위한 실험실로서의 기능을 제공하였다. 그러나 탑재 하중, 높은 시험 비용, 심각한 안전상의 문제점 등으로 실험기회는 제한되었다. 대신 매우 짧은 시간 동안임에도 불구하고 우주선에서와 마찬가지로 저중력 환경을 제공하는 “자유낙하”의 지상시설에서 많은 연구가 행하여 졌다. 이러

한 시설은 (1) 낙하 타워, 여기서의 실험시설은 10초간 무중력상태를 제공하는 거리 동안 낙하 (2) 25초 동안 저중력(해수면 중력의 약 10^{-1})을 제공하는 포물선 궤도에 대하여 비행하는 항공기 (3) 낮은 궤도(포물선)로 방사되어 제위치에 오는 Sounding rockets 은 10분 정도의 무중력을 제공한다.

3. 우주에서 화재 거동

가. 화재 전조와 훈소(smoldering)

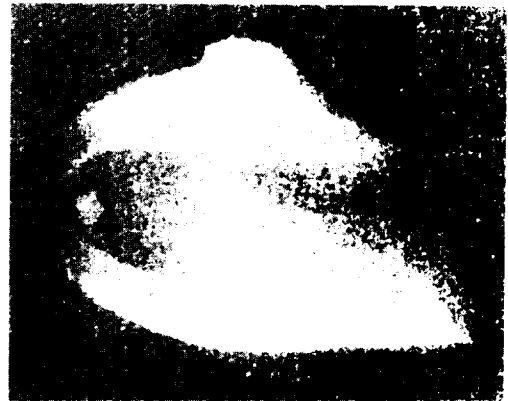
무중력 환경은 여러 상황에서 발화를 억제하거나 반대로 많은 경우에 발화를 확대시킬 수 있는 것으로 나타났다. 자연 대류가 거의 존재하지 않으므로 물체로부터 주변으로 열이동은 무척 감소되었다. 따라서 축열되는 부품의 온도는 급격하게 계속 상승할 수 있고 과온과 발화의 가능성이 높게 된다. 1992년 서틀의 전선 절연 인화성(Wire Insulation Flammability, WIF) 실험에서 무중력 조건 하에서 과부하 전선에 의해 도달하는 열 속도 및 최대 온도는 정상 중력 대기 조건에서 도달하는 것보다 더 크다는 것이 밝혀졌다. (사실 온도는 비-대류 진공 조건 하에 도달하는 것과 비교하였다.)

또한, 무중력 환경은 우주에서 전형적인 밀도-추진 거동을 감소시킨다. 이것은 아래로 입자를 침전시키거나 가스를 위로 뜨게하지 않고 액체 혹은 분말 유출(spill)에 따른 위험을 창출하게 한다. 유출 혼합물은 우주선 내에서 “구름”으로 잔존하면서 매우 느리게 퍼져나가게 된다. 많은 물질에 대하여 이 에어로졸은 높은 인화성이 될 수 있다. 또 다른 특이한 우주 위험은 조그마한 화재로부터 뜨거운 액체 혹은 증기 방울의 분출이다. 서틀 WIF 관찰 결과는 그림1에서 명확히 보여지는 것과 같이 타고 있는 전선 절연체로부터 발생하는 방울과 용융 단편들을 보여주고 있다. 정상 중력에서는 이러한 단편들은 냉각되어 아래로 떨어진다. 그러나 무중력상태에서는 이것들은 바깥 방향으로 추진되어 뜨거운 발화원으로 작용하게 될 수 있다.

한편, 연구 결과 2개의 연소 표면이 무중력에서 서로 방해하는 것으로 밝혀졌다. 1cm 정도의 거리로 떨어진 평행한 2장의 종이가 타고 있을 경우 안정한

화염이 양쪽의 외부 표면으로 확산되고 있음에도 2종이 사이의 틈에서는 화염이 없는 것으로 밝혀졌다. 정상 중력에서는 화염은 완전히 쉬트를 둘러싸게 된다. 하나의 양초가 또 다른 양초에 접근해 갈때 양초 화염이 소화되는 것과 같은 주목되는 현상은 무중력 상태에서에서만 일어나는 특이한 현상으로서 아마도 연소 생성물의 축적에 의한 것으로 생각된다.

또한, 비-대류 무중력 환경은 혼소를 촉진시킨다. (느린, 저온 열분해와 산화 반응, 과열된 다공성 물질에서 대개 나타남) 1992년 서틀 실험에서 원통형 폴리우레탄 폼은 발화하여 자립한 형태의 훈소를 일으켰다. 측정된 온도는 전형적인 연소 온도보다 훨씬 낮은 최고 온도 $350-400^{\circ}\text{C}$ 였다. 그러나 이러한 온도는 대응되는 정상 중력에서 그것보다 다소 높았다(약 15°C). 물론 이것은 감소된 대류 냉각에 기인한 것이다. 무중력 상태와 정상 중력 상태에서 화재 현상



【그림 1】 무중력에서 폴리에틸렌-절연 전선 연소. 화염 전파 및 공기 흐름은 왼쪽에서 오른쪽으로 움직인다. 화염 존에서 밝은 작은 방울과 전선 주위의 용융된 어두운 절연체를 주목한다.

상 가장 중요한 차이점은 무중력 상태에서는 가벼운 가스(일산화탄소, 이산화탄소, 메탄)의 방출이 크게 증가하는 것이다. 예를 들면, 정상 상태에서 일산화탄소를 분석하면, 수 ppm농도가 얻어지는 반면 무중력 상태에서는 100-400ppm의 농도가 된다. 이것은 아마도 우주공간에서 산소-이동 결핍에 기인한 것으로

생각된다.

나. 인화성과 화염 확산

앞에서 기술한 바와 같이 정상 중력 화재는 화염 존(Zone) 주위로 부력-추진 흐름을 항상 발생시킨다. 이것은 자연-대류 흐름(대개 1m/s 이상으로)이 화염존으로 산소이동을 계속시키고 화염확산을 촉진시킨다. 무중력 상태에서는 실제로 정지한 화염 환경이 존재할 수 있다. 정적인 조건임에도 불구하고, 적어도 얇은 판의 재료에서는 초기의 정지한 무중력에서 발화 및 화염 확산이 발생할 수 있다는 것을 실험에서 보여 주고 있다. 이러한 정지된 환경에서 화염 확산은 일정하게 확산하나 무척 느리다. 이것은 정상 중력조건에서 보다 약 15% 정도 낮은 속도를 나타낸다. 또한, 화염확산에 대한 최소, 한계산소농도는 정상 중력에서 보다 정지한 무중력에서 더 높다.(즉, 인화성 범위가 감소된다) 이러한 차이는 그림2에서 보여 주고 있는데 몇가지 조건에서 얇은 종이의 연소속도에 관한 실험 자료를 요약한 것이다. 참고로 A선은 대기 산소 농도 상태의 정상 중력에서 전형적인 아래방향으로 화염 확산 속도를 보여 주고 있다. B선에서 보는 바와 같이 정지한 무중력 조건에서 상응하는 확산 속도는 상당히 낮다(확산 속도가 느리다). B선은 더 높은 한계산소농도를 나타내므로 정지한 무중력 조건에서 연소 범위는 감소한다. 정상 중력 환경과 정지 무중력 환경 사이의 화염 확산 속도차가 높은 산소 농도 분위기에서는 감소되는데 이와 같은 이유는 높은 산소 농도 분위기에서는 화염존에 산소가 잘 공급되어 대류 흐름에 의한 보충이 별로 중요하지 않기 때문이다.

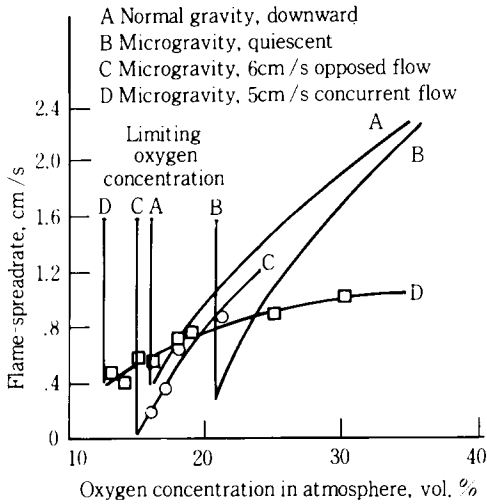
실제적인 의미에서 우주선의 분위기는 환기 흐름 때문에 자주 요동한다. 매우 낮은 속도라도 부가되는 강제 흐름은 무중력 화재에 큰 영향을 미친다. 그림2에서 C선은 무중력 하에서 화염 확산에 반대되는 방향으로 공기가 흐르는 조건에서의(6cm/s 이하 속도) 얇은 종이 화염 확산 속도 및 인화성(연소성)에 관한 실험 데이터를 보여주고 있다. 강제 공기 흐름이기 때문에 무중력 화염 확산 속도는 정지 무중력에서 발견되는 것들보다 빠르게 되고 이것들은 정상 중력에서 기록된 속도에 접근하고 있다.

인용된 비교사항들은 주로 얇은 물질의 연소에 관한 지상 실험에서 데이터를 취하였는데 이것은 무중력 상태를 이용 가능한 시간이 매우 짧기 때문에 연소 과정을 촉진시키기 위한 시험연료가 필요하였다. 그러나 우주선에서 몇가지 실험은 좀더 대표적인 더욱 두꺼운 물질(재료)에 대한 화염을 연구하였는데 이것은 혼소하는綿, 불타는 전선 절연체 및 플라스틱 시트를 포함하였다. 다양한 서틀 프로그램 중의 하나인 고체 표면 연소 실험에서 얻어진 예비 데이터를 살펴 보면, 두꺼운(3.2cm) 폴리메틸메타아크릴레이트(PMMA) 시트에 대한 화염 확산은 얇은 물질에서 관찰되는 일정 확산 현상에 비하여 일정하지 않았고, 또한 화염이 연료에 의해 진행됨에 따라 감소하면서自己消火 가능성을 가져오는 것으로 보여 주고 있다.

다. 화염 특성과 감지

무중력에서 화염 현상은 정상 중력에서와는 무척 다르고 가변적이다. 정지된 조건에서 연소되는 얇은 물질은 일반적으로 엷은 청색을 띠면서 거의 보이지 않는 화염을 나타낸다. 대조적으로 보다 높은 산소 농도 혹은 강제 흐름의 화재-조장 조건 하에서 연소하는 것들은 흔히 밝고 그을음이 있는 화염을 나타낸다. 얇은 종이에 대한 화염 전파의 전형적인 예를 그림3에서 보여주고 있다. 화염은 정상 중력에서 보통 감싸고 있는 형태를 띠고 있는 반면에 무중력에서는 명확하게 연료의 양면에서 일정한 거리만큼 떨어져 있는 분리된 열편(裂片)모양을 형성한다. 화염의 앞쪽 끝부분의(그림의 오른쪽) 색깔은 옅다. 그러나 화염의 중심부는 밝다. 왜냐하면, 본 예의 서틀 시험이 고농도 산소 및 고압조건에 실시되었기 때문이다. 또다른 무중력 화염의 모습은 그림1의 예(강제 공기 흐름)에서 보여주는데 이것은 연소되는 전선 절연체의 모습이다. 화염은 연료를 둘러싸고 있고 끝이 개방된 늘어선 구형에 가까운 모습이다. 최근 유럽 우주국은 인화성 시험을 비행체에서 실시하여 또한 그와 같은 것을 관찰하였는데 정지한 공기에서 종이 및 옷의 화재는 거의 육안으로 보이지 않고 온도 측정값은 거의 완전 연소상태를 나타내었다.

초기 화재에서 복사하는 가스상태의 입자 방출(emission)은 감지를 위한 표시 혹은 중요한 척도로

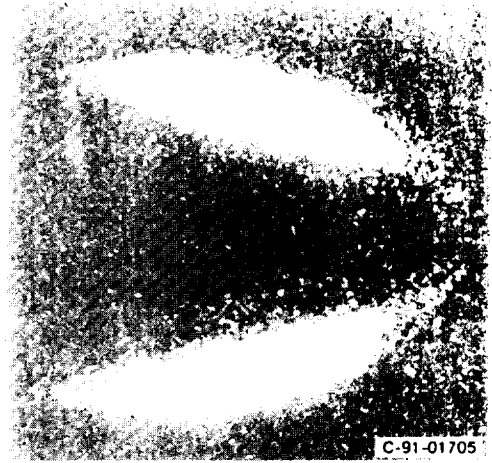


【그림 2】 101kPa의 압력에서 얇은 종이에 대한 연소실험 결과의 요약. 도표상의 점들은 C와 D의 곡선에만 표시되어 있다.

서 이용되고 그것의 성분 분석과 형태파악은 중요하다. 기록된 바와 같이 우주선에서의 화재로부터 연기, 복사(방출)는 정지조건 하에서 거의 보이지 않는 모습에서부터 화재 조장 조건 하에서 진한 그을름과 밝은 색깔에 이르기까지 다양한 모습을 보여준다. 또한, 연구 결과는 무중력 연기 기류에서의 성분 입자의 크기와 모양에서 정상 중력 기류에서의 그것과 다르다는 것을 보여주고 있다. 예를 들면, 무중력에서 과열된 플루오르 수지 전선 절연체로부터 나오는 연기 입자를 분석하여 보면, 정상 중력 방출에서 보다 평균 입자 크기가 더 크게 나타나고 있다. 또한, 입자-크기 분포 범위는 중요 기본 입자에서부터 형성된 대부분의 집합체에 있어서 무중력에서 더 크다. 이와 같은 덩어리가 생성되는 이유는 아마도 화염이 무중력에서 더 긴 기간 동안 존재하면서 느린 질량이동을 하였기 때문이다. 위에서 인용된 바와 같이 서둘 혼소 시험에서 흥미로운 사실을 알 수 있는데 정상 중력과 비교하여 무중력에서 가벼운 가스가 상당히 많이 방출된다는 점에서 주목된다.

라. 소화

미국 우주선 스카이랩에서 수행한 초기 시험은 분



【그림 3】 무중력상태에서 얇은 종이(보이지 않음)가 왼쪽에서 오른쪽으로 전파되는 화염의 가장자리 모습. 화염의 앞쪽은 엷은 청색이나 나머지 부분은 밝은 황색이다.

위기 배기(atmospheric venting)와 물분무에 의한 소규모 시험을 통하여 우주에서 소화에 대하여 연구하였다. 물분무는 효과적이었지만 제어하기가 어렵다. 물이 연소되는 물질에 충분히 주수되지 않으면, 뜨거운 입자를 소산시키게 된다. 또한, 진공 청소기로 소화하는 것도 효과적이다. 그러나 강제대류로 화염이 강화(強化)되기 때문에 소화에 앞서서 주의해야 한다. 기타 실행된 연구로는 얇은 종이의 자기소화와 화염 확산 속도를 감소시키기 위해서 불활성가스를 분위기 중(선실)에 투입하여 그 효과를 측정하는 것이 있다. 이러한 시험은 무중력 상태에서 연소 한계에 대한 희석가스의 상호 영향을 평가하는데 유용하지만, 화재의 진압과 소화약제 투입 등 실제적으로 설비를 설치하여 운용하지 않고 있다.

또한, 현재는 화염 진압을 위한 배기의 효율성을 연구하고 있다. 공식적으로 10cm/s의 상부 방향으로 흐르는 공기 속에서 직경 1.9cm의 원통형 PMMA를 수평으로 놓고 바닥 표면을 따라 뜨거운 전선으로 발화시키고 그 결과 발생하는 화재를 배기로 진압하였다.

(다음호 계속)

Fire & Materials, Vol20, (1996)