

# 우주선에서의 화재 안전

## 4. 우주선 화재 예방을 위한 적용

### 가. 일반 방침

무중력 우주선 환경에서 특히 저속의 강제 흐름이나 환기 유도 흐름이 존재하여 우주선내에 화재가 발생한다면, 화재가 확산될 수 있는 여러 증거를 인용된 연구에서 얻을 수 있다. 따라서 화재 예방은 유인 우주선에서 필수적이다. 미국 서틀에서 첫번째의 방어 개념은 재료와 발화원을 엄격하게 통제하여 화재 예방의 신뢰도를 높이는 것이다. 두 번째 방어 개념은 발화시 즉각적으로 대응하는 것으로 우주선 내에 화재 감지시스템과 진압시스템을 설치하는 것이다.

현재 영구궤도 위성인 국제 우주정거장(ISS)은 건설중에 있다. ISS는 서틀보다 크고, 보다 긴 임무기간을 갖기 때문에 서틀보다 화재사고 확률이 높고 화재안전규정이 더욱 엄격하다.

본 논문의 이번 단락은 유인 우주선의 화재 예방에 대한 일반적인 원칙과 ISS에서 화재 안전에 관한 사항 중에서 진행중이거나 제안된 것을 모은 것이다.

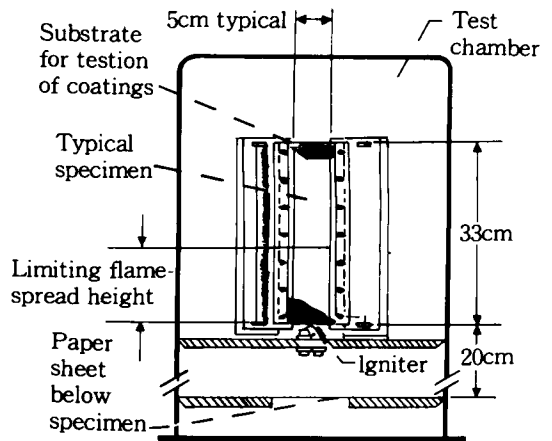
### 나. 화재 예방

우주선의 거주 공간에 사용된 재료들은 방염기준을 통과한 재료에서 선택한다. 예를 들면 시트, 폼, 코팅의 형태로 된 일반적인 재료는 상부 화염 전파 시험(Upward Flame Propagation Test)을 하였고, 이 시험은 정상 중력상태에서 부력의 방향으로 화염을 촉진시키는 모양으로 배치하여 실시한 것이다. 이러한 시험은 우주선 분위기(atmosphere) 혹은 공기로 채워진 밀봉된 챔버에서 실행하였다.(그림4) 25초 동

안 조장된 발화원에 노출된 후, 시험재료가 15cm 미만의 거리에서 연소되지 않거나 점화기에서의 화염이 전파되지 않으면 합격된 재료로 한다. 또한, 합격된 재료는 뜨거운 입자를 소산시켜 표본 아래에 설치된 종이 시트를 발화시키지 않아야 한다.

내화도에 근거하여 우주선 선내에 사용 가능한 수천 품목에 대한 데이터 뱅크가 구축되었다. 인화성 재료의 심사 선별은 물론 화재 감지와 진압 장비를 포함하여 우주선 화재 안전 기술의 시험은 단순히 편의주의에서라기 보다 필요성에 근거하여 지상에서 실행되었다. 현재의 연구는 무중력하의 특정조건에서(예로, 환기 흐름 조건 하에서)는 재료가 더욱 쉽게 연소될 수 있고, 정상중력 조건에서 보다는 화염 확산 속도가 비슷하거나 더욱 빠를 수 있다는 것을 보여주고 있다.

따라서 정상 중력의 재료 데이터 베이스에서 일반



【그림 4】 우주선 재료의 품질 측정을 위한 NASA 상부 화염 전파 시험 장치.

적으로 화재 안전에 안전하다고 생각되는 물질이 우주선에서는 안전하지 않을 수 있다. 종이, 필름, 면 의류 및 타올, 발포 패드, 상업용 계기 및 부품같은 가연성 물품을 우주선 내에 배치할 경우에는 미리 임무 전에 설치 위치를 결정하여야만 예상 화염 전파 경로를 구획하고 봉쇄하여 화재 위험을 최소화할 수 있다.

## 다. 우주선 분위기

서틀과 ISS의 표준 분위기는 공기이다. 즉, 전압 101kPa에서 질소 79%, 산소 21%의 혼합물로 구성되어 있다. 제어 허용 오차는 최대 산소농도를 24%까지 상승하는 것을 허용한다. 선외(船外) 활동에 앞서 우주선 내의 분위기 상태를 미리 조절하여 승무원의 편의를 도모하기 위해서는 예외적으로 우주선의 분위기를 규정된 시간 동안 전압 70kPa에서 최대 산소농도 30%로 바꾸기도 하는데 이를 위해서는 예외적으로 우주선 내 공기 중의 질소를 제거해야 한다.

또한, 우주선 분위기를 특정 성분으로 교체하면, 승무원의 생명을 유지시켜 주는 동시에 인화성을 억제할 수도 있다. 우주선 내 분위기를 그러한 특정 성분으로 바꾸는 방법은 모든 질소 혹은 일부 질소를 고열용량 회석제로 교체하거나 최소 산소 분압으로 우주선 내의 분위기를 바꾸는 것이다. 이러한 분위기를 유지하는데 기술적으로 상당한 연구가 필요하고, 이러한 분위기에 승무원 및 우주선 내 재료(물질)들이 장기간 노출되면 발생할 수 있는 문제점에 대하여 많은 연구가 필요하므로 이것을 '화재 안전' 분위기로 이용하는 것은 미래의 희망으로 남아 있다.

## 라. 화재 검지와 대응

무중력에서 화염의 외양, 연기 농도 및 이러한 신호 전달 특성을 잘 알지 못하기 때문에 우주선에 설치할 효과적인 화재 감지시스템을 개발하는데 큰 어려움을 겪고 있다. 현재 서틀과 서틀의 가압된 화물실의 실험실은 이온화식 감지기를 사용한다. 부력이 없는 곳에서 효과적인 샘플 채취를 위해서 또한, 큰 분진 입자의 공기역학적 분리를 위해서 감지기는 일체형 팬을 사용하고 있다.

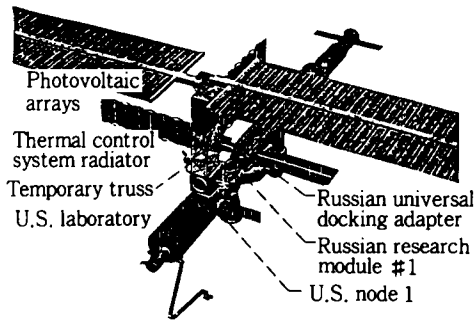
우주선 승무원에 의하든 자동식 감지시스템에 의해 화재를 감지하든 화재 사고에 즉각적으로 대응하는 방법은 국부적으로 전원을 차단하는 방법과 공기흐름을(냉방 혹은 환기) 차단하는 방법이 있다. 물론, 공기 흐름을 차단하는 방법은 화염과 가스의 누출을 억제하기 위한 상식적인 접근 방법이다. 공기 흐름을 차단하게 되면 무중력 연소에서 진정한 정지 조건(상태)을 가능하게 한다는 것을 연구 도중에 우연히 밝혀졌다. 이것은 화염 확대를 막게 한다.(그러나, 반드시 화염확대를 막는 것은 아니다.)

또한, 무중력에서 물리적 확산 형태, 소화 특성 및 우주선 분위기 청소 절차에 대하여 정보가 부족하므로 우주선에서 효과적인 운영이 가능한 화재 진압시스템을 개발하는데 어려움을 겪고 있다. 화재 감지시스템과 마찬가지로 우주선 화재 진압 방법은 주로 지상의 항공기에서의 화재 진압시스템을 개조한 것이다. 현재, 서틀과 서틀의 가압된 화물실의 실험실은 할론1301 소화기를 비치하고 있다. 우주선 승무원은 덮개 패널에 접근구를 통하여 소화기 노즐을 삽입함으로써 장치 구획실의 은폐된 내부에 소화약제를 방사한다. 또한, 서틀은 소화기가 접근할 수 없을 경우, 방호를 위하여 3개의 전자기기실에 고정식, 원격조정 소화설비를 설치하고 있다. 할론1301은 오존을 파괴하는 물질이므로 현재 국제 협약으로 생산을 금지하고 있으나, 서틀에 설치된 현재의 시설은 무기한으로 존속시키고 있다.

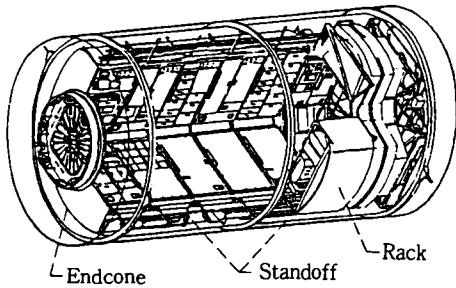
## 5. 우주 정거장에서 소화 설비 규정

### 가. 우주 정거장의 일반적 사항

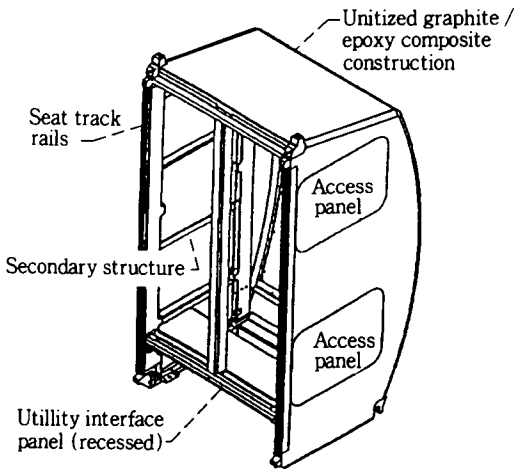
미국과 국제 공동 제휴로 운영되는 국제 우주 정거장(ISS)은 우주에서 과학, 탐구, 상업활동을 위해서 영구히 지구를 선회하면서 서로 연결되는 형태의 우주선이 될 것이다. 그림5는 ISS의 설명도인데 어느 정도 완성되어 부분적으로 조립된다. 그림6은 가압된 실 중의 하나인 미국 실험실 모듈(module)의 모양을 보여 주고 있다. 대표적으로 미국 실험실은 개방된 중앙 코어 주위 4부분의 직각 위치에 수납장을 설치하고 있다. 수납장과 모듈벽 사이에 유선형 부분에는(standoff라고 함) 내부 연결 배관과 케이블을 수용



【그림 5】 국제 우주 정거장 개략도



【그림 6】 국제 우주 정거장의 가압실의 개략도  
(미국측 실험실 모듈)



【그림 7】 국제 우주 정거장의 표준 수납장의 개략도.

하고 있다. 그림7은 수납장의 일반적인 구조를 설명하고 있다.

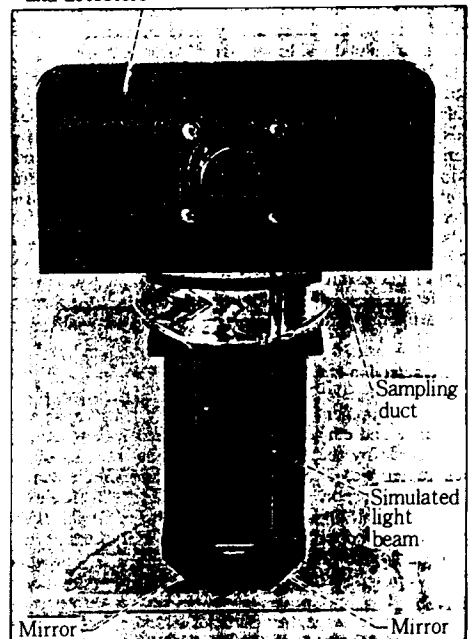
ISS는 안전 전략 차원에서 저 전류 전선, 퓨우즈, 전기적 접지, 엄격한 재료 선택을 통하여 화재예방을 강조하고 있다. 화재 전파 경로를 막기 위해서 내화

그라파이트-에폭시 수납장 벽체, 전기 장치 수납을 위한 밀폐된 케이스와 같은 방법도 화재 전파 경로를 제공하지 않기 위해서 화재예방차원에서 설치된다. 또한 시스템 수납장(예를 들면, 환경, 통신 및 전력 장치)은 소화기 삽입을 위하여 수납장 덮개에 구멍과 연기 감지기를 설치한다.

#### 나. 화재 감지

ISS는 연기 입자에 의해서 light beam의 산란과 차단(암흑화) 원리로 작동되는 광전식 연기 감지기를 설치하고 있다. 광전식 감지기는 서틀의 이온화식 감지기를 대신하여 선택되었는데 이것은 저 전력 소비량, 경량화 및 단순한 구조 때문이었다. 그림8은 감지기의 대표적인 모델을 보여 주고 있다. 감지실에서 발생한 레이저 광선은 샘플링 덕트를 통과하여 감지실의 센서로 다시 돌아오게 된다. 연기 입자에 의해서 광선이 차단됨에 따라 광선이 감소하므로 직선의 광선 통로상에 있는 하나의 센서가 감지하게 된다.

Electronics housing,  
with laser source  
and detectors



【그림 8】 국제 우주 정거장의 광전식 연기 감지기 실물 모형.

또한 연기입자에 의해서 광선이 산란하게 되어 광선 통로상에 있는 두 번째 센서가 감지하게 된다. 감지기 설정점에 도달하게 되면, 지구(지역) 표시창과 알람 모두가 작동한다. 또한 승무원은 감지기가 작동하기 전에 이상을 발견하면 알람을 울릴 수 있다.

비록 대부분 ISS에는 팬에 의한 흐름을 감지할 수 있는 덕트가 설치되어 있음에도 불구하고, 부력 흐름(지상의 천장 부착형 감지기에서는 큰 도움이 됨)이 존재하지 않으므로 감지를 위한 분위기 샘플링(연기 표본 추출)이 어렵다. 무중력상태의 어떤 조건 하에서는 초기 화재에서 연기가 발생하지 않는다는 연구 결과를 주목하여야 한다. ISS 연기 감지기를 선택하는 감도 기준을 화재 초기에서 저농도로 연기가 방출되어 비록 시각으로 감지할 수 없지만, 감지기로는 감지할 수 있는 것을 선택해야 한다. 오보를 최소화하고 실제사고에 바로 대응할 수 있는 수준으로 경보를 설정해야 한다. 감지기의 위치와 감도는 물론 알람 설정을 최적화하기 위해서는 무중력상태에서 화재 전조(초기 화재)에 관한 정보가 필요하다. 무중력 연기 특성에 관한 현재의 자료는 심하게 과열된 전선 절연체와 층류 확산 가스 분사에서 발생된 초기 화재 단계를 단지 모델화한 drop-tower 시험에서 대부분 얻어졌다. 1996년 3월 실시한 셔틀 시험에서는 무중력에서 화재 모델로부터 연기방출을 조사하였는데 이것은 향류 환기 흐름(대표적인 탄화수소 연료로부터의 검댕을 모델하기 위한)하의 촛불 시험과 4개의 과열된 재료-비행 기록 서류 파일(종이), 실리콘고무, 테프론(polytetrafluoroethylene) 절연 전선, 캡톤(poly

imide) 절연 전선-의 시험에 관한 것이었다.(그림 9) 사고나 화재에 감지기의 감도 및 반응시간을 결정하기 위해서 연소 챔버 내에 아랫방향으로 흐르는 연기에 셔틀 감지기와 기본형 ISS 감지기를 노출하여 시험하였다.

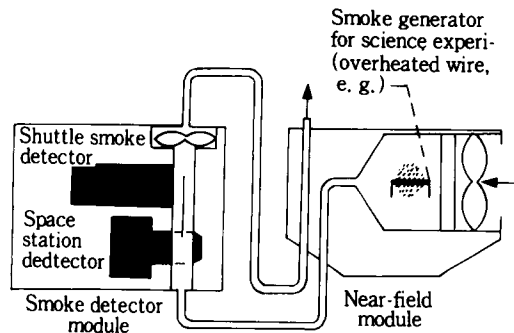
또한, 연기 감지기보다는 센서 특히 화염 복사 센서가 ISS에 의해 제안되고 있다. 복사 감지시스템은 일직선의 시계 관측이 가능하고 우주선 선실과 같이 개방된 공간을 감시하는데 최적의 감지기이다. 화염 감지기는 초기 스카이라이프 우주 정거장에 한 때 설치되었지만, 전력보존 및 에너지 보존 문제 때문에 ISS에서는 논의의 대상에서 제외하였다. 그러나, 유럽우주국(ESA-European Space Agency)은 우주선 모듈용으로 자외선 및 광대역 광학 화염 감지시스템을 적용하는 방안을 적극적으로 연구하고 있다.

ISS에서 제안한 또다른 화재 감지 방법은 초기 화재나 혼소를 나타내는 주성분인 일산화탄소를 추적하여 감지하는 것이다. 현재 환경 안전 측면에서 전력보존문제로 일정한 간격으로 측정하므로 초기 화재 감지에는 도움이 되지 않고 있다.

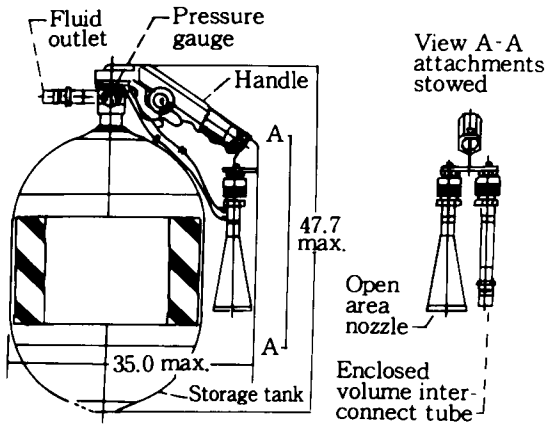
## 다. 화재 진압

ISS의 각 거주실은 1개 이상의 진화 장비를 설치하게 되며, 이것에는 이산화탄소 소화기와 산소로 충전된 자급식 호흡기를 포함하고 있다. (그림10) ISS소화기는 2개의 노즐로 구성되며 하나는 개방된 공간에 방사할 원뿔형의 노즐이고 또하나는 수납장 벽체판넬 개구부에 삽입하여 은폐된 공간에 방사하기 위한 어댑터 노즐이다. 일부 수납장이나 독립된 실험용 유료 화물은 국소 화재제어를 위해 고정식 내부 진압 설비를 설치하는 것도 가능하다.

이산화탄소는 셔틀에서 사용되는 할론1301을 대체하는 소화약제로 ISS에서 규정하고 있다. 이산화탄소는 장래에도 이용 가능한 물질이며, 이산화탄소를 이용한 화재 진압 기술은 이미 과학적으로 입증되었고, 할론화합물이 발생하지 않는 장점이 있다. 현재 초기 농도의 반으로 화재 지역의 분위기 산소를 희석하는 것에 기초하여 방출량과 방출율을 보수적으로 규정하고 있다. 감지시스템 때문에 정상 중력에서의 기술을 바로 적용하는 것은 부적당하다. 소화



【그림 9】 무중력에서 감지기 반응 평가 및 연기 특성을 결정하기 위한 비교 검댕 진단 프로젝트의 개념도



【그림 10】 국제 우주 정거장의 이산화탄소 소화기의 설계 개략도(단위는 cm)

약제의 확산을 통제하는 것과 최소량의 소화약제를 사용하여 급속하게 화재를 진압하는 최적의 소화약제 농도, 우주선 분위기와 벽면에서 과도한 독성이 존재할 수 있는 소화약제를 제거하기 위한 기술이나 정보가 부족하다. 이산화탄소를 과도하게 방출하여 발생하는 독성 위험을 피하기 위해서 ISS는 이산화탄소 대체 소화약제로 질소를 제안하였다. 그러나, 이산화탄소 소화약제를 이용한 소화설비의 뛰어난 기술효용성 때문에 이산화탄소를 여전히 사용하고 있다. 비-가스계 소화약제인 수성막포(AFFF) 소화약제를 대체 소화약제로 사용하기 위해서 저중력 비행 시험을 ESA에서 실시하였다. 정상 중력에서 수성막포 소화약제는 물체 표면에 막을 형성하여 산소를 차단하여 화재를 진압하므로 무중력에서도 마찬가지로 산소를 차단하여 화재를 진압할 수 있을 것이라고 예상하였다. 그러나, 방출된 포소화약제의 우주선 내에서 확산과 이것을 제거하는 데 따른 어려움으로 말미암아 ISS에서 비-가스계 소화약제를 사용하는 것은 비실용적이라고 결론을 내렸다.

또한, ISS는 진압하기 어려운 화재나 접근하기 어려운 화재를 제어하기 위한 최후 수단으로 우주선 국소 분위기를 진공으로 배기하는 방법이 있다. 승무원이나 지상 통제실에서 구획실을 배기하여 소화하는 방법은 화재 진압을 위해 충분히 낮은 전압(total pressure)이 화재 초기 10분 내에 이루어져야 하는 것을 요구한다. 이것은 배기 속도에 관하여 합리적인 그러나 임의의 한계 범위를 규정하고 있다. 너무 낮은

속도는 명백히 진압을 지연시키게 된다. 그러나 너무 빠르면 초기 화염 강화(強化)의 원인이 될 수 있다.

## 라. 화재 후 복구

우주 정거장은 영구히 궤도를 선회하도록 설계되었기 때문에 화재 후 발생하는 화재 잔존물을 제거하여 선내를 원상복구시키는 작업은 궤도상에서 이루어져야 한다. 환경 제어시스템은 분위기에서 응축된 오염물과 가스상태의 오염물을 추적하여 제거하도록 설계되었지만 조그마한 화재에서 방출된 물질조차도 우주선 선내의 시스템으로 처리할 수 없다. 혁신적인 대규모 비상 정화시스템 설치를 현재 고려 중에 있다.

## 6. 우주선 화재 안전상 필요한 사항과 문제점

우주선에서 화재 예방, 감지, 진압시스템은 지상 및 항공기 시스템에서 채택된 기준과 기술을 사용하고 있다. 무중력 연소 연구는 현재 상당히 활발하게 화재 거동 측면에서 연구하고 있다. 그러나, 실제 우주선 화재 안전에 적용할 만한 결과는 별로 나오고 있지 않다. 결과적으로 현재 화재 안전시스템은 과도하게 설치되지 않았으면 쓸모없을 수 있고, 최악의 경우에는 특정 화재 상황을 방호하기 위해 부적절할 수 있다.

우주선 화재 안전에 필요한 사항을 다음에 요약하였다.

- (1) 현존하는 데이터 베이스를 확장하기 위한 정상 중력 인화성 시험의 결과와 무중력 재료 인화성 시험결과의 상관관계 연구.
- (2) 효과적인 샘플채취와 알람기준에 대한 화재전조 탐지 특성 정보를 적용함으로써 우주선에서 화재 감지시스템 향상.
- (3) 소화약제의 효능, 대응시간, 물리적 확산에 관한 정보를 적용함으로써 우주선에서 화재 진압 기술의 향상.
- (4) 승무원이 우주선 내에서 안전하게 계속 임무를 수행하기 위해서 우주선 내의 안전환경을 확실하게 확보할 목적으로 우주선 분위기와 벽체에서 연소 생성물 및 소화약제를 제거하기 위한 방법론 개발.