

우주비행기 환경제어 및 생명유지 시스템

김현기, 김성찬
한국항공우주연구원
e-mail: shotgun1@kari.re.kr

Environmental Control and Life-support System in Space Shuttle

Hyun-gi Kim, Sungchan Kim
Korea Aerospace Research Institute

요약

우주는 인간이 생존하거나 기계가 작동하기에 매우 거친 환경이다. 따라서, 승무원과 더불어 우주선이 생존하려면 모든 시스템을 건강하고 행복하게 유지할 수 있는 방법이 필요하다. 환경 제어 및 생명유지 시스템이 우주와 같이 거친 환경에서 거주 가능한 환경을 제공하는 장치이다. 환경 제어 및 생명 유지 서브시스템은 크게 열 제어와 생명 유지의 역할을 수행한다. 본 연구에서는 우주에서의 열제어 방법과 생명유지를 위한 기본원칙에 대해 파악하였다. 그리고, 승무원, 열 그리고 물, 공기, 음식 및 폐기물 관리와 같은 생명유지 시스템에 필요한 요구사항을 분석하였다. 마지막으로, 우주에서의 생존을 위한 환경제어 및 생명유지 시스템의 설계 및 해석, 그리고 요구사항에 대한 유효성 검사를 위한 시험방법에 대해 파악하였다.

1. 서론

우주는 인간이 생존하거나 기계가 작동하기에 거친 환경이다. 따라서, 승무원과 우주선의 생존성을 보장하려면 모든 시스템의 건전성을 유지할 수 있는 방법이 필요하다. 우주와 같이 거친 환경에서 거주 가능한 환경을 제공하는 것이 환경제어 및 생명유지 시스템(Environmental Control and Life-support System, 이하 ECLSS)이다.

본 연구에서는 우주환경에서의 열 제어 방법과 생명유지를 위한 기본원칙, 그리고 생존을 위해 필요한 ECLSS에 대해 파악하였다. 그리고, 우주환경에서 열 제어를 위해 ECLSS가 사용하는 방법을 조사하고, 그에 대한 장단점을 분석하였다. 또한, 승무원, 열, 그리고 물, 공기, 음식 및 폐기물 관리에 필요한 생명유지 시스템의 요구사항에 대해 분석하였다. 마지막으로, 우주환경에서 ECLSS 사용 여부를 확인하기 위한 방법으로, ECLSS의 설계 및 해석, 그리고 요구사항에 대한 유효성 검사를 위한 시험방법에 대해 파악하였다.

2. 열 제어

일반적으로 우주환경에서의 열 제어 방법에는 수동 열 제어(passive thermal control)와 폐쇄 루프 능동 열 제어(closed-looped, active thermal control)의 두 가지 방식이 있습니다. 수동 열 제어는 전체 시스템에 열전도 경로를 설계에 반영하여 열의 입출력이 가능하도록 우주선의

온도를 제어하는 개방형 루프 수단(open-loop means)입니다. 수동 열 제어는 가장 용이하고, 추가 제어입력이 필요하지 않다는 장점이 있다. 하지만, 제어해야 하는 열이 너무 많거나 환경을 예측할 수 없다면 사용하는데 문제가 있을 수 있다. 이러한 상황에서는 폐쇄 루프 능동 열 제어를 사용해야 한다. 참고로, 능동 열 제어는 작동 유체, 히터, 펌프 및 기타 장치를 사용하여 열을 이동하고 방출하는 방법이다.

2.1 외부 열 제어

외부 열 제어의 과제는 우주선 안팎으로의 열 흐름을 관리하는 것이다. 우주환경에서는 태양과 지구가 주요 외부 열원이 된다. 우주의 진공 상태에서 태양을 향하는 면은 엄청나게 뜨거워지고, 반대편은 몹시 차가워진다. 이 온도차의 균형을 맞추는 간단한 방법은 “바비큐(barbecue)” 모드라고 하는 능동 열 제어 방법인데, 태양에 수직인 축을 중심으로 우주선을 천천히 회전시키는 방법이다. 이 모드에서는 우주선 표면이 태양을 향할 때 번갈아 가열되고 차가운 우주를 향할 때는 냉각되어 핫스팟 없이 적당한 표면 온도를 유지할 수 있다. 참고로, 아폴로 우주선은 이 방법을 사용하여 달까지 왕복하였다고 한다.

다음은 흡수되는 열의 양을 조절하는 것이다. 우주선의 표면 코팅 유형을 변경하여 온도를 제어할 수 있는데, 재료를 신중하게 선택하여 흡수된 열과 방출된 열의 비율을 조절함으로써, 우주선의 표면온도를 원하는 수준으로 유지할

수 있다. 이를 위해 우주선의 금속표면 위에는 다양한 유형의 다층 단열재(multi-layer insulation, MLI)를 배치한다. MLI 또는 단순히 Mylar 또는 Kapton 접착 테이프를 표면에 적용하여 여러 영역에서 흡수되는 열의 양을 조절하여 단열할 수 있는데, 올바른 표면 코팅과 단열재를 선택하기만 하면 수동적 수단을 통해 우주선의 열 제어 요구사항의 약 85%를 충족할 수 있다. 그림 1은 UARS(Upper Atmospheric Research Satellite) 외부에서 열 제어에 사용되는 MLI를 보여준다[1].

진공으로 둘러싸인 우주 공간에서 열을 방출하기 위해 전도나 대류를 사용하는 것은 가능하나 쉽지는 않다. 우주 왕복선은 “플래시 증발기”라는 장치로 과도한 열을 제거하는데, 워터 펌프로 뜨거운 서브시스템을 식힌 후, 우주선 밖으로 배출한다. 하지만, 이 방법은 우주왕복선에 여분의 물이 있는 경우에만 가능하기 때문에, 긴 시간의 임무에서는 비실용적인 능동 열 제어 방법이다. 따라서, 우주환경에서는 복사가 열을 방출하는 가장 효과적인데, 열을 방출하기 위해서는 낮은 흡수율과 매우 높은 방사율을 갖도록 라디에이터라고 하는 우주선의 특수표면 영역을 설계해야 한다.



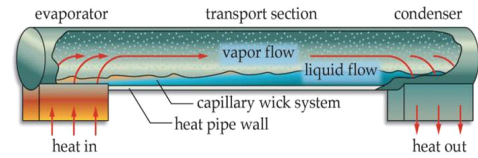
[그림 1] UARS 의 다층단열재

2.2 내부 열 제어

내부 열 제어 기술은 열을 얼마나 빨리 이동해야 하는지와 이동해야 하는 열의 양의 관점에 따라 달라진다.

시간이 중요하지 않을 때는 적당한 양의 열을 제거하기 위한 쉬운 방법으로 단순하게 뜨거운 구성요소에서 수동 외부 라디에이터로 열전도 경로를 설정하는 것이다. 이 경로는 열전도 금속으로 둘 사이를 연결하는 것처럼 간단하다. 열의 양과 이를 제거해야 하는 긴급성이 증가하는 경우에는 복잡하고 능동적인 열 제어가 필요하다. 이 방법들 중에서 히트 파이프는 가장 간단한 개방형 루프 능동 열 제어 기술로써, 히트파이프 안의 유체가 기화되면서 많은 양의 열을 흡수하여 내부 열을 제어한다. 그림 2는 히트 파이프의

열 제어를 개략적으로 보여준다.



[그림 2] 히트 파이프

3. 생명유지 기본 원칙

3.1 산소

생명유지 시스템은 우주에서도 호흡이 가능하도록 충분히 높은 분압으로 O₂를 제공해야 한다. 해수면에서 O₂ 분압은 101kPa(14.7psi)의 20.9%, 즉 약 21kPa(3.07psi)이다. 생명유지 시스템은 O₂ 분압을 지구 해수면 표준에 가까운 22±1.7kPa(3.2±0.25psi)으로 유지해야 하는데, 너무 높은 분압에서 산소를 호흡하는 것은 잠수병(the bends)을 일으켜 위험할 수 있기 때문에 주의해야 한다. 또한, O₂ 분압이 승무원 객실에 화재 위험을 일으키지 않도록 충분히 낮아야 하고 화재 위험을 줄이기 위해 산소와 질소의 혼합물이 포함되어야 한다. 참고로, 48kPa(7psi) 미만의 O₂ 분압은 안전한 것으로 간주하고 있다.

3.2 물과 식량

우주 비행시에는 폐기물을 최소화 하면서, 충분한 물과 음식을 보류해야만 한다. 먼저, 인간은 생존을 위해 하루에 최소 약 2리터의 식수를 필요로 한다. 생명을 유지를 위한 최소 식수 외에도 개인위생, 설거지, 빨래 등을 위해서도 물이 필요한데, 모두 합하면 1인당 하루에 최대 20리터가 넘을 수 있다. 또한, 식량도 필요하다. 평균적인 인간은 하루에 체중 1kg당 약 29칼로리가 필요한데, 이는 일반적인 70kg의 승무원이 하루에 최소 1972칼로리를 필요로 한다는 것을 의미한다.

질량과 부피를 보존하기 위해, 음식의 많은 부분을 탈수하거나 말린 후 우주에서 다시 수분을 공급하는데, 포장방법과 필요한 총 칼로리에 따라 일일 1인당 최대 2kg의 음식을 계획한다고 한다. 아폴로와 우주왕복선의 미국 유인 비행기의 경우, 전력 생산에 사용되는 연료 전지의 부산물로 물이 생성되어, 승무원들은 원하는 만큼의 물을 사용할 수 있었다. 하지만, 러시아 미르 우주정거장과 같은 장기 임무의 경우에는 무인 보급 우주선이 몇 달마다 발사되었다고 한다.

3.3 쓰레기 관리

우주 프로그램에서 가장 많이 묻는 질문 중 하나는

“우주에서 화장실은 어떻게 가는가?”였다. 초기에는 간단한 대장조영술 형태의 가방을 사용한 후, 우주선 밖으로 버리거나 분석을 위해 지구로 돌려보내기도 하였다. 하지만, Skylab 프로그램[2]을 통해 우주에서 화장실 사용의 불편함이 완화되었고, 이 후 강제 공기를 사용한 흡입력을 통해 크게 개선되었다고 한다. 또한, 우주선에서는 숯과 수산화리튬이 들어있는 캐니스터(금속용기)가 공기를 여과하고, 수산화리튬은 CO₂와 화학적으로 반응하여 필터에 가둔다고 한다. 또한, 숯을 사용하여 냄새와 기타 오염 물질을 흡수한다고 한다.

3.4 폐쇄루프 생명유지

시스템 관점에서 승무원 및 생명유지 시스템은 본질적으로 개방 루프이다. 물론, 온도와 실내 대기를 모니터링 하는 폐루프 측면도 있지만, 모든 입력 시스템(공기, 물, 음식)은 결국 폐기물로 버려지기 때문이다.

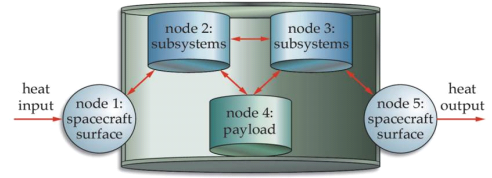
수개월 또는 수년 동안 임무가 지속되는 경우 모든 보급품을 가져가거나 재보급에 의존하는 것은 용이하지 않다. 따라서, 물과 기타 폐기물을 회수하고 재활용할 수 있는 폐쇄형 시스템을 구축해야만 한다. 이러한 폐쇄 루프 시스템은 폐기물이나 CO₂를 재활용하여 물과 음식을 제공함으로써, 운반하는 화물 무게를 크게 줄일 수 있는 방법이다. 따라서, 현재 우주선의 거의 모든 것을 재활용하여 수년간 지속되는 임무에 필요한 산소, 물 및 식량을 승무원에게 제공할 수 있는 시스템을 찾고 있다.

4. 시스템 공학

4.1 해석과 설계

열 제어 시스템 설계의 가장 큰 목적은 모든 상황에서 열 입력과 내부 열과의 균형을 맞춰서 열평형을 유지하는 것이다. 햇빛이 가득한 곳에서는 물건을 따뜻하게 유지하는 것이 문제가 되지 않고, 우주 환경의 어둠 속에서 사물을 시원하게 유지하는 것은 큰 문제가 되지 않는다. 하지만, 햇빛에서 시원하게 유지하고 그늘에서 따뜻하게 유지하는 것은 문제가 될 수 있다.

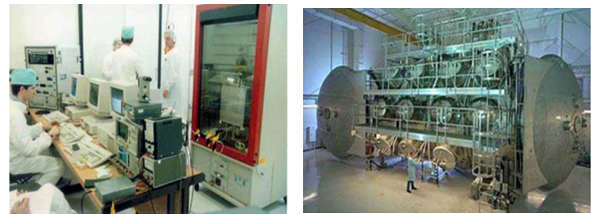
열 흐름을 관리하는 방법 중 하나는 그림 3과 같이 전체 시스템을 일련의 노드로 나누고, 전체 시스템의 상세 열 모델을 만드는 것이다. 여기서, 열 노드는 열 속성이 있는 모든 페이로드, 하위 시스템 또는 구조의 일부로써, 각 노드의 열 속성(열 입력, 흡수율, 방사율 등)을 신중하게 정의해야 한다. 이후, 모든 노드를 연결하고 복잡한 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하여 평형 온도를 계산한다[3].



[그림 3] 열 분석 기술

4.2 시험

우주환경의 진공 및 극한온도 조건을 테스트하기 위해 그림 4(a)와 같이 개별 구성요소, 서브시스템 및 전체 우주선에 대한 열 순환 시험을 수행한다. 이 테스트에서는 구성품들을 우주에서 직면하는 광범위한 극한온도에 노출시키는데, 이 테스트를 통해서 열 순환의 실패 여부를 결정하게 된다. 그림 4(b)와 같이 크고 값비싼 열/진공 설비를 사용하여 열 순환에 강력한 진공을 추가할 수도 있는데, 이러한 “thermal-vac” 테스트는 보다 현실적인 열 전달 상황을 구현할 수 있다[4]. 이런 혹독한 테스트에서 문제가 발생하지 않으면 ECLSS의 검증이 완료된 것으로 판단할 수 있다.



(a) 열 순환 시험장비

(b) 열 진공 시험설비

[그림 4] 우주 열 순환시험

5. 결론

본 논문에서는 우주 환경에서 생존을 위한 기본원칙과 ECLSS의 요구사항에 대해 분석하였다. 우주에서 열 제어를 위해 사용하는 방법을 살펴보고, 각 방법의 장단점을 분석하였다. 또한, ECLSS에 대한 요구사항을 분석하였고, 설계 및 해석 그리고 요구사항에 대한 유효성 검사를 위한 시험방법에 대해 파악하였다.

후 기

본 연구는 2023년도 주요사업(FR23G03, 우주비행기 구조 및 세부계통 개념연구)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] <https://eosps.nasa.gov/missions/upper-atmosphere-research-satellite>

- [2] <https://ko.wikipedia.org/wiki/스카이랩>
- [3] J.R. Wertz, J.L. Wiley, "Space Mission Analysis and Design", Third edition. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [4] S. Kang, H. Ha, S. Han, S. Seo, "Thermal Vacuum Test and Thermal Analysis for a Qualification Model of Cube-satellite STEP Cube Lab", Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences 44(2), 156-164, 2016. DOI:10.5139/JKSAS.2016.44.2.156