

무중력 환경에서 추진기관의 문제점 및 연구 동향

길경섭* · 임하영** · 조인현**

The Study Trend and Problems of Propulsion System in a Zero-gravity Environment

Gyoung-Sub Kil* · Ha-Young Lim** · In-Hyun Cho***

ABSTRACT

The propulsion systems such as upper stages of launch vehicles, orbiters, spacecrafts have to operate in the zero gravity environment. Because the flight condition where the vehicle undergoes is different from the normal gravity state, many studies have been being in progress. Fluid behavior in the zero gravity condition is differently shown in the normal gravity state because the importance of the intermolecular force, such as adhesion, cohesion, and surface tension is enlarged. In this paper, we investigate the characteristic of fluid behavior and describe effects and problems on the liquid propulsion system due to these fluid behavior. We also check which studies are in progress in order to solve these problems.

초 록

발사체의 상단, 궤도선, 우주비행선 등의 추진기관은 불가피하게 무중력 환경에서 작동해야 한다. 이러한 비행체들이 겪는 비행 환경은 일반적인 중력장과 다르기 때문에 이에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 무중력 상태에서의 유체의 거동은 부착력, 응집력, 표면장력 등의 비중이 커지기 때문에 중력이 있는 상태에서와 다르게 나타난다. 본 논문에서는 무중력 환경에서 유체의 거동 특성에 대하여 알아보고 이런 유체의 거동 특성이 액체추진기관에 미치는 영향과 문제점에 대해 기술한다. 또한 이 문제점을 해결하기 위해 어떤 연구들이 진행되고 있는지 알아본다.

Key Words: Zero gravity(무중력), Intermolecular force(분자력), Propulsion system(추진기관), Surface tension(표면장력), Propellant storage(추진제 저장)

1. 서 론

* 한국항공우주연구원 추진제어팀

** 한국항공우주연구원 추진제어팀

*** 한국항공우주연구원 추진제어팀
연락처, E-mail: kgs@kari.re.kr

무중력(Zero-G)은 중력의 영향력이 없는 우주 비행 환경을 설명할 때 주로 쓰이는 용어로서, 우주 비행환경은 비행체에 탑재된 물체의 질량을 무시할 수 있게 만든다. 이러한 무중력 상태

에서의 유체의 거동은 중력이 작용하는 지구에서는 중력에 비해 아주 작기 때문에 무시되던 부착력, 응집력, 표면장력 등의 분자력으로 인해 중력장에서와 매우 다른 거동특성을 보인다. 분자력들은 중력 같은 큰 힘이 작용하는 유체 시스템의 설계에는 너무 작기 때문에 무시한다. 그러나 무중력 상태에서는 이러한 분자간의 힘들이 유체의 움직임을 좌우하게 된다. 따라서 유체 시스템을 다루는 추진기관의 설계에서는 무중력 상태에서 유체의 거동에 관한 연구가 필수적이다.

이 논문에서는 무중력 즉 분자상호간의 힘이 영향력이 있는 영역을 논의하고, 무중력 상태에서의 유체의 움직임을 관한 시험 결과를 제시한다. 또한 무중력 환경에서의 유체의 거동 특성으로 인해 추진기관에 발생하는 여러 가지 문제점과 해결책에 관한 연구들을 제시한다. 또한 국외 연구기관, 산업체 그리고 많은 대학들이 수행하고 있는 연구 개발 프로그램들을 소개한다.

2. 이론적 연구

정역학적 유체의 거동에 대한 실험적 연구가 두 가지 액체(wetting & non-wetting)에 대해 수행되어왔다. 그림 1은 무중력 환경에서의 접촉각이 90도 보다 작은 액체 즉 퍼지는 액체(wetting liquid)의 거동을 보여준다.

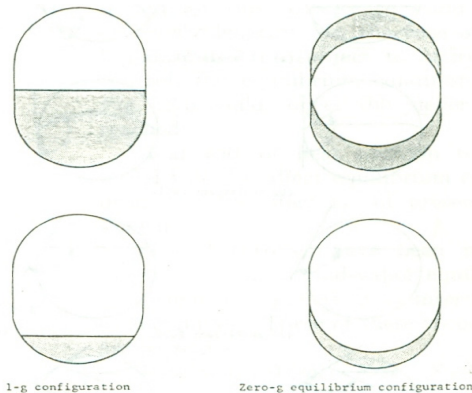


Fig. 1 Hydrostatic behavior of a wetting liquid in the intermolecular force regime.

이 퍼지는 액체는 구형 버블을 형성하며 용기의 표면을 따라 퍼지게 된다. 버블의 위치는 임의로 변하나 온도가 증가함에 따라 액체의 표면장력이 감소하기 때문에 버블은 가장 온도가 높은 쪽으로 이동하게 된다. 이 현상은 액체의 위치를 결정하는데 중요한 정보를 제공한다. 만약 탱크의 출구 쪽의 온도가 높으면 버블은 출구 쪽으로 이동할 것이기 때문이다.

3. 무중력의 문제점 및 해결책

무중력 환경에서는 유체의 거동 특성과 응축 및 기화 특성으로 인해 많은 문제점이 발생한다. 특히 액체 추진기관의 재시동, 추진제의 저장, 압력손실, 유회 등의 어려움이 존재하며 이를 해결하기 위한 많은 연구들이 수행되고 있다.

3.1 액체 추진기관의 재시동

무중력 상태에서 액체 추진제를 사용하는 추진기관은 재시동을 위해 탱크의 출구에 액체만이 존재하게 하는 것이 가장 중요한 문제가 된다. 액체 추진제는 분자력이 지배적으로 작용하는 환경에서는 그림 3과 같이 거동한다. 추진기관에 사용되는 추진제와 가압제는 극저온 유체들로 대부분 퍼지는 액체(wetting liquid)이다. 퍼지는 액체는 하나의 액체막이 용기의 내부 표면과 접촉해 있다면 완벽하게 퍼지는 액체처럼 거동하는 것이 무중력 상태에서 예상되는 현상이다. 따라서 탱크 출구에 액체만이 존재하도록 하기 위한 다양한 방법들이 사용되어야 한다. 무중력 상태에서 재시동을 위해 Super critical storage system, centrifugal separator, bottoming rocket, expulsion system, capillary system, trap device, vapor-drive jet pump 등이 연구되고 있다.

이 방법들은 추진기관의 종류, 크기, 용도 등에 따라 적용방법이 다르다. 비교적 추력이 큰 발사체의 상단에는 bottoming rocket을 사용하며 우주 왕복선의 추력과 같이 추력이 작은 추진기관은 expulsion system과 capillary system을

주로 사용한다.

Saturn-V 상단에 적용된 bottoming rocket은 ullage engine과 ullage motor가 적용되었다. Ullage engine은 그림 2와 같이 연료시스템 (Monomethyl hydrazine), 산화제 시스템, 점화 시스템(Hypergolic, Nitrogen tetroxide), 가압시스템으로 구성되며 추력기 시스템의 각종 장치를 활용한다. Ullage engine는 J-2 엔진 점화와 coating 구간 사이에서 약 50초 동안 점화되며 J-2 엔진 재 점화전에 다시 점화된다.

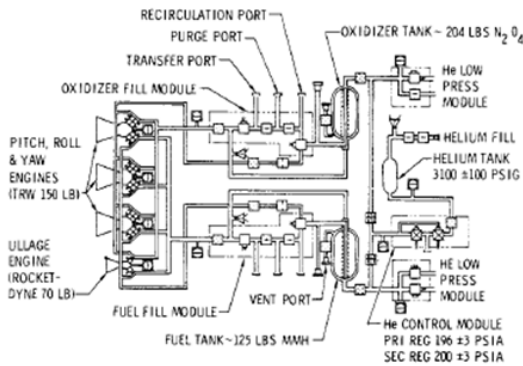


Fig. 2 Ullage engine of Saturn-V



Fig. 3 Ullage motor of Saturn-V

Ullage motor는 그림 3과 같이 90도 간격으로 네 개가 장착되어 있으며 2단과 3단의 분리과정 동안 약 4초가 점화된다. 이 때 벤트 시스템이

작동하게 된다. 벤트 시스템은 무중력에서는 추진제의 탱크 내 위치를 알 수 없으므로 가속이 발생할 경우에만 작동하게 된다.

무중력 상태에서 가속 없이 탱크 출구에 액체만이 존재하게 하는 방식 중 모세관 현상을 이용하는 방법이 많이 사용된다. 중력이 없는 환경에서는 표면장력이 지배적으로 작용하므로 이 힘을 이용하여 그림 4와 같이 탱크의 하부에 액체가 공급될 수 있도록 하는 장치가 사용되고 있다.

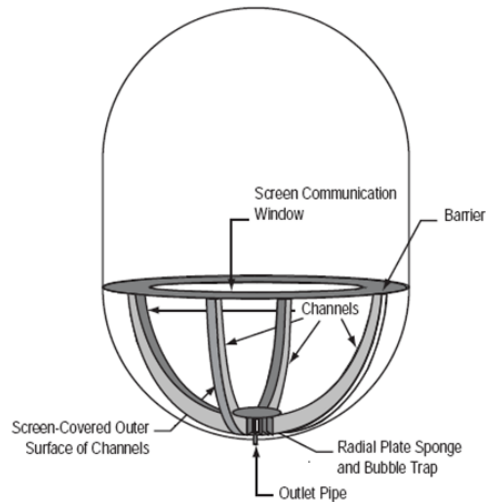


그림 4. Capillary system

3.2 추진제의 저장

무중력 환경에서는 추진제의 위치를 알 수 없기 때문에 열전달 효과 분석, 벤트 시스템, 무게 중심의 변화 등이 문제점이 발생한다.

첫 번째, 무중력 평형 상태에서의 열전달 효과는 현재까지 알려져 있지 않다. 정확한 비등현상을 분석하기 위해서는 액체와 기체의 위치를 알고 있어야 하기 때문에 열전달 효과는 매우 극저온 추진제를 취급할 때 매우 중요하다. 탱크 내부벽과 증기막의 단열 효과는 비등을 줄일 수 있다는 것은 앞서 무중력 상태에의 비등에 관한 논의를 통해 언급되었다. 따라서 열전달은 전도와 복사뿐이다.

두 번째, 극저온 추진제가 저장된 탱크의 압력

상승을 방지하기 위해 증기를 배출시키는 것도 또 하나의 중요한 문제가 된다. 추진제 탱크의 벤트는 추진제의 위치가 벤트 시스템에 위치해 있을 때 가스와 함께 추진제가 빠져나오는 경우가 있다. 이것을 해결하기 위한 방법은 액체와 기체를 분리하는 방법으로 capillary system, centrifugal separator, bottoming rocket 등과 연동해서 벤트시스템을 작동해야 한다.

극저온 유체는 매우 작은 표면장력을 갖고 있기 때문에 벤트 장치의 경우 다공성 스크린이나 플러그를 사용하는 것은 적합하지 않다. 그러나 이 시스템들이 작동할 때와 상관없이 압력상승을 방지할 수 있는 thermal venting system이 연구 중이다. 이 시스템은 그림 5와 같이 Joule-Thomson cooler를 이용하여 추진제를 냉각시키기 때문에 추진제의 온도 성층화를 방지하여 기화되는 것을 막을 있다. 따라서 독립적인 벤트 시스템을 구현할 수 있다.

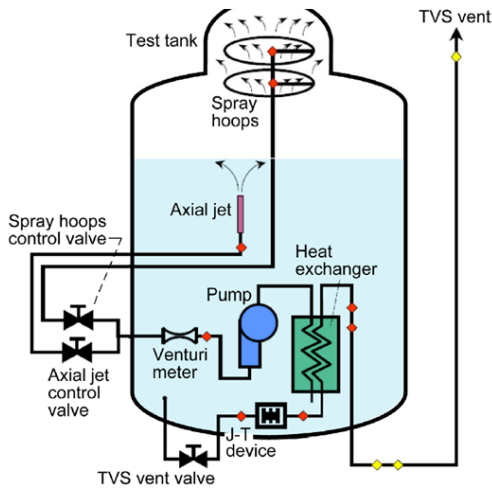


그림 5. LOX TVC system

세 번째 또 다른 문제점은 비행체의 무게 중심의 변화이다. 액체가 구속되어 있지 않은 상태에서 아주 작은 가속이 발생하면 비행체의 무게 중심이 크게 이동하게 된다. 이러한 고려사항 때문에 각 저장 시스템의 안정성은 매우 중요하다.

그림 6은 Delta IV에 적용된 pulse setting sequence의 전 후에 추진제의 모습을 보여준다. 추진제의 sloshing으로 인한 무게중심의 변동을 pulse setting sequence로 안정화 시키는 연구를 하고 있다.

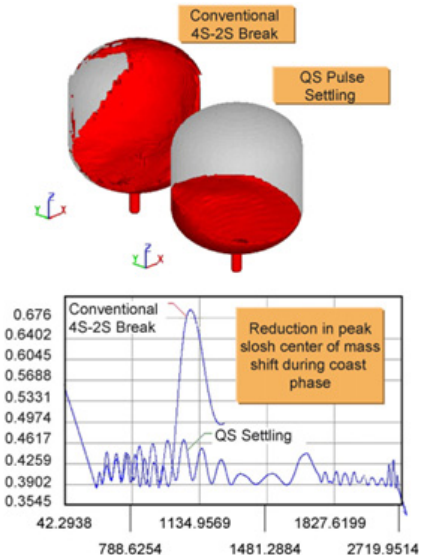


그림 6. Pulse setting sequence

4. 결 론

무중력 환경에서의 유체 거동은 중력장에서와 다르기 때문에 비등과 응축, 열전달, 벤트, 재시동, 운환 등 여러 가지 문제점들이 발생하며 분자력을 이용하는 방식, 가속을 발생시켜 중력을 모사하는 방식, 극저온 냉동기를 사용하는 방식 등을 사용하여 이를 극복해 내는 연구 방법이 적용되고 있다.

본 논문에서는 무중력 환경에서 발생하는 유체의 특성과 추진기관에 나타나는 문제점 그리고 해결책에 대한 연구 동향에 대해 알아보았다.

앞으로 개발될 우주 발사체 및 우주 비행체에 연구에 기초 자료로 사용 될 수 있을 것으로 사료된다.