

무중력 환경에서 추진기관의 문제점 및 연구 동향

길경섭*, 임하영**, 이경원***, 조인현****

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

Gyoung-Sub Kil*, Ha-Young Lim**, Kyung-Won Lee***, 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)

* 길경섭, 한국항공우주연구원 추진제어팀
kgs@kari.re.kr

** 임하영, 한국항공우주연구원 추진제어팀
hylim@kari.re.kr

*** 이경원, 한국항공우주연구원 추진제어팀
lkw@kari.re.kr

**** 조인현, 한국항공우주연구원 추진제어팀
ihcho@kari.re.kr

1. 서 론

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 상태에서의 유체의 거동은 중력이 작용하는 지구에서는 중력에 비해 아주 작기 때문에 무시되던 부착력, 응집력, 표면장력 등의 분자력으로 인해 중력장제서와 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 유체시스템을 다루는 추진기관의 설계에서는 무중력상태에서 유체의 거동에 관한 연구가 필수적이다.

이 논문에서는 무중력 즉 분자상호간의 힘이 영향력이 있는 영역을 논의하고, 무중력 상태에서의 유체의 움직임에 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

2.1 액체의 분자력

무중력이란 용어는 중력의 영향이 없는 우주에서도 비행 조건을 묘사할 때 주로 사용된다. 중력의 영향이 없다는 환경은 여러 가지 방법으로 표현된다. 간단한 표현 방법은 D'Alembert 원리에 따른 것으로 이 시스템은 질량자체의 기준으로 볼 때 각각의 질량은 평형상태에 있는 것이다. 평형상태라는 것은 중력과 방향은 반대이며 동일한 관성력(원심력)이 발생할 때 나타난다. 자유낙하처럼 관성력과 중력이 상쇄되어 다른 힘이 작용하지 않는 상태를 무중력이라 한다.

부착력(Adhesion), 응집력(cohesion), 표면장력

(surface tension)과 같은 분자력들은 모든 유체들이 갖고 있는 특성이다. 이 힘들의 크기는 매우 작아서 중력과 같은 큰 힘이 존재하는 유체 시스템의 설계에서는 보통 무시된다. 그러나 무중력 상태에서는 이 분자력은 중요하게 된다.

분자력(F_c)의 크기는 단위 길이 당 표면장력(σ_{lg})과 특성길이(L or πD)의 곱으로 다음과 같이 표현된다.

$$F_c \approx \sigma_{lg}L \quad \text{or} \quad F_c \approx \sigma_{lg}\pi D$$

액체는 확산하는 특성에 따라 그림 1과 같이 확산하는 액체(wetting liquid)와 확산하지 않는 액체(non-wetting liquid)로 나누어진다. 확산하는 액체는 표면을 따라 퍼지며, 확산하지 않는 액체는 퍼지지 않는 특성을 갖고 있다.

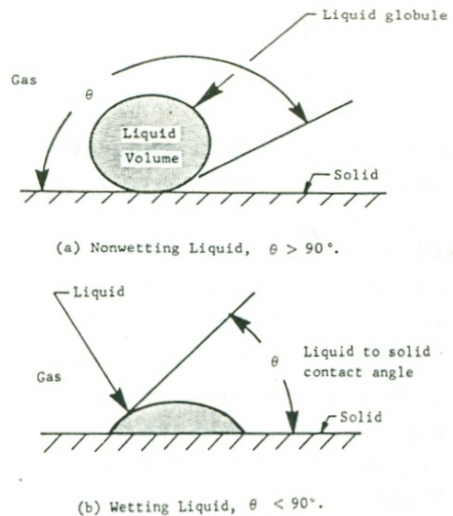


그림 1. liquid-to-solid contact angle.

이런 현상을 설명하는 두 가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 분자력을 사용하며, 두 번째 방법은 접촉각으로 액체를 구분하는 방법이다.

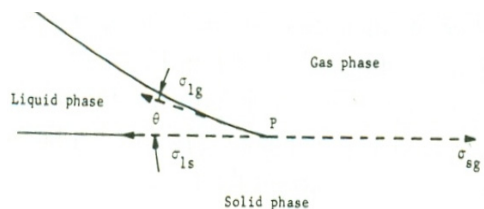


그림 2. Interfacial surface tension force diagram.

액체는 부착력이 응집력보다 클 때 표면을 따라 퍼진다. Dupre 방정식은 그림 2의 액체, 고체, 기체 사이에 작용하는 표면장력(σ)들의 평형 조건을 나타낸다.

$$\sigma_{sg} - \sigma_{sl} = \sigma_{lg} \cos\theta \text{ (Dupre - equation)}$$

이 방정식은 아래와 같이 수정된다.

$$\sigma_{sg} - \sigma_{sl} = \sigma_{lg} \cos\theta + K$$

여기서 K는 Harking's spreading coefficient이다.

$$K = (\sigma_{sg} - \sigma_{sl}) - \sigma_{lg} \cos\theta$$

K가 양수이면 즉 부착력($\sigma_{sg} - \sigma_{sl}$)이 응집력($\sigma_{lg} \cos\theta$)보다 크면 액체는 퍼지게 된다. 만약 K가 음수이면 유체는 퍼지지 않게 된다.[1]

표 1. Spreading Coefficient(K) For n-Heptane On Various Metals.

Metal	Temperature(°C)	K(erg/cm)
Copper	25	33
Silver	25	38
Lead	25	51
Iron	25	54

표 2. Liquid-to-Solid Contact Angle Measurements.

Solid	Phase	Liquid	Contact Angle
Glass	Air	Water	0
Glass	Air	Mercury	128-148
Glass	Air	Hydrogen	0
Glass	Air	Nitrogen	0
Glass	Air	Oxygen	0
Steel	Air	Water	70-90
Steel	Air	Hydrogen	0
Steel	Air	Nitrogen	0
Steel	Air	Oxygen	0

표 1과 같이 문헌에서 볼 수 있는 K(Harking's spreading coefficient)의 이론값 또는 실험값은 극히 제한되어 있다. 이러한 한계 때문에 표 2와 같이 실험을 통해 액체와 고체사이의 접촉각으로

액체를 구분하는 방법이 더 많이 사용된다. 표 2와 같이 일반적으로 추진기관에 사용되는 액체산소, 액체수소, 액체질소 등은 퍼지는 액체에 속한다. 따라서 추진기관 내의 유체의 거동을 알기 위해서는 퍼지는 액체의 거동 특성에 관한 연구가 필요하다.

2.2 유체 거동 특성

정역학적 유체의 거동에 대한 실험적 연구가 두 가지 액체(wetting & non-wetting)에 대해 수행되어왔다. 그림 3은 무중력 환경에서의 접촉각이 90도 보다 작은 액체 즉 퍼지는 액체(wetting liquid)의 거동을 보여준다. 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.

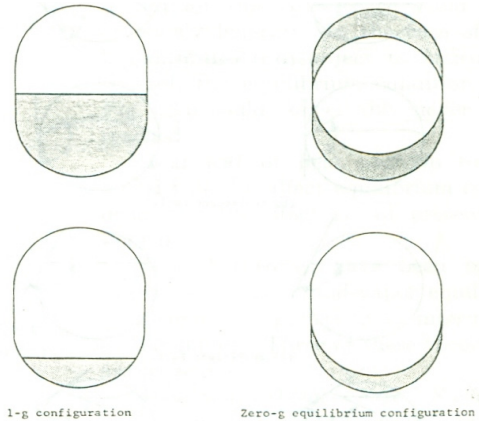


그림 3. Hydrostatic behavior of a wetting liquid in the intermolecular force regime.

2.3 무중력에서의 기화

중력장에서는 핵비등(nucleate boiling)과 막비등(film boiling)이 지배적인 기화 현상이다. 핵비등은 가열된 표면에서 버블이 무질서하게 형성되

는 것이 특징이다. 이 기화현상은 막비등보다 낮은 열유량과 액체와 가열된 표면의 작은 온도차에서도 발생한다. 막비등은 버블의 형성이 빠르고 가열된 표면에 증기 층이 형성될 때 존재한다. 그림 4는 전형적인 비등곡선을 보여준다. 기화에 대한 무중력의 영향은 그림 5에서 볼 수 있다. 이 시험에는 물을 매질로 사용하였다. 이 시험 결과는 대류는 없고 단지 전도와 복사만이 존재할 때 발생하는 흥미로운 버블 형성과정을 보여준다. 무중력 상태에서의 이론적인 버블 이론은 현재 활발하게 연구 중에 있다.

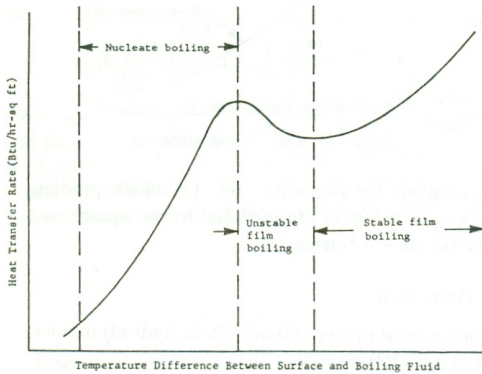


그림 4. Typical fluid boiling regimes.

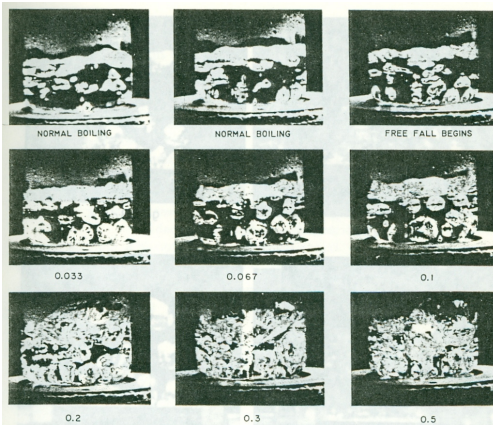


그림 5. Boiling in normal and zero gravity fields.

여러 문헌에 의하면 핵비등이 유지될 수 있는 최대 열유량은 중력에 비례하여 변화한다. 그러므로 막비등은 무중력 하에서는 낮은 열유량에서도

발생할 수 있으며 이 때 형성되는 증기막의 열차단율이 커져 추진제의 증발을 줄여준다. 따라서 무중력 환경에서는 낮은 막비등의 열유량 특성으로 인해 추진제의 온도 단열효과가 커지는 장점을 갖게 된다.

2.4 무중력에서의 응축

무중력 상태에서는 비등보다 응축이 훨씬 복잡한 문제가 된다. 보조 추진 시스템에서 사용되는 기체 사이클은 정확한 응축기 설계 기준이 있어야 한다. 응축과정은 증기사이클의 낮은 압력 측이므로 압력 손실이 중요하다. 그러므로 설계자는 응축액의 생성과 계면의 안정성을 정확하게 예측해야 한다. 퍼지는 액체는 응축기의 내벽에 붙어서 생성되는 경향을 보인다. 응축액 계면은 기체의 속도 기준 값에서 섭동을 발생시키며 불안정하다. 이러한 섭동이 압력손실에 큰 영향을 미치며 기체의 유동 불능상태를 초래할 수도 있다.

퍼지는 유체는 튜브의 내벽에 응축방울을 형성하며, 이러한 현상은 유동손실을 발생시킨다. 기체는 응축방울을 축 방향으로 벽을 따라 밀어 내어 다른 응축방울과 함께 큰 물방울을 형성시킨다. 증기의 속도가 큰 물방울을 밀어낼 수 없게 되면 유동 불능상태가 될 수 있다. 이러한 슬러깅(Slugging) 현상은 퍼지는 유체와 퍼지지 않는 유체에서 모두 문제가 된다.

3. 무중력 환경 모사 방법

해외 연구기관들은 주로 다음과 같은 세 가지 방법으로 무중력 상태에서 유체에 대한 연구를 수행한다.

3.1 낙하 시험(Drop test)

낙하시험 장비는 기초적인 유체의 거동과 열전달 현상을 관찰하는데 유용하다. 이 시험은 drop tower 또는 drop tube를 사용하며 시험 조건을 비교적 쉽고 정확하게 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이 장치는 시험 대상에 작용하는 필요 없는 힘들을 제

거하여 자유낙하 시간동안 분자력에 의한 현상만이 관찰되도록 할 수 있다. 2초 이상 시험 할 수 있는 낙하 장비로 무중력 상태에서 유체의 거동을 충분히 관찰할 수 있다. 그림 6은 미국에 구축되어 있는 자유낙하시험 장치의 모습을 보여준다. 미국 이외에도 유럽과 일본에서는 자유낙하 시험 장치를 이용하여 무중력에서의 연소 특성과 액체의 거동 특성에 관한 기초연구를 수행하고 있다.

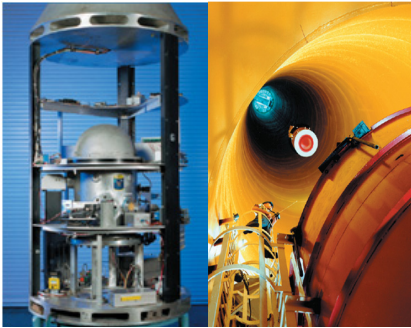


그림 6. Free falling test of NASA Glenn research center.

3.2 비행 시험(Aircraft flight test)

항공기를 이용한 비행 시험으로 궤적에 따라 무중력을 40초까지 얻을 수 있다. Keplerian 궤적은 그림 7과 같다. 시험 대상은 비행기 내에서 있기 때문에 외부 환경으로부터 보호되며, 비행기와 함께 자유 낙하 상태에 있게 된다.

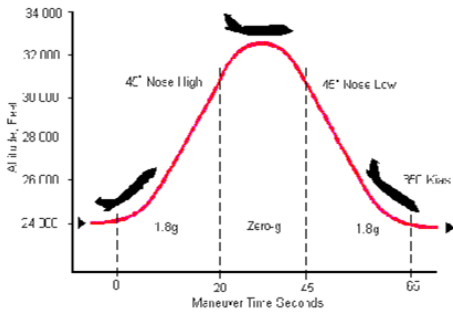


그림 7. Keplerian trajectory airplanes test.

비행기와 공중에 떠있는 시험 대상이 부딪치지 않게 비행 기동을 하는 것은 어려우며, 비행기 내

에 시험 대상 때문에 비행 궤도를 이탈하는 것은 몇 피트 이내이어야 한다. Aero-systems division of wright-patterson air force base에 따르면 C-131과 KC-135 비행기는 25번 기동 시 단 1번 만 15초 이상 무중력 상태에 도달하였다고 한다.

비행 시험의 시험 시간은 낙하 시험보다 더 길지만 낙하 시험에서는 가능한 미세 제어를 하기 힘들다. 비행기는 무중력 상태에 들어가기 전에 액체에 외력을 작용시키며, 낙하 시험에서는 가능한 충격완화 시간이 없다는 단점을 갖고 있다.

3.3 미사일 시험(Missile test)

긴 자유 낙하 시간을 획득하기 위해 미사일이나 과학로켓에 캡슐을 탑재하여 무중력 상태를 얻을 수 있다. 이 시험 캡슐은 약 175 mile 고도에서 방출되며 9분까지 자유 낙하가 가능하다. 그러나 캡슐이 파손되기 때문에 telemetry를 통해서만 데이터를 획득할 수 있다. 이 시험은 데이터 획득에 성공하는 것이 가장 어려운 기술적 난제이다.

1960년대 초기에 NASA에서는 그림 8과 같은 극저온 추진제 탱크를 시험 대상으로 약 21분 동안 자유 낙하하며 무중력에서의 극저온 추진제의 핵비등, 압력 상승, 구조 성능 등에 관한 연구 결과를 도출하였다.[2]

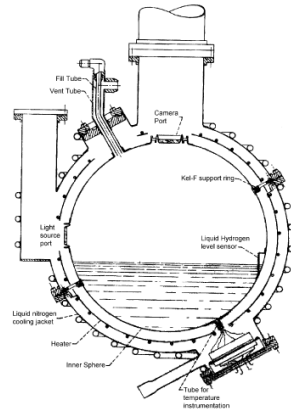


그림 8. Sounding rocket Propellant management test.

4. 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.

4.1 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 하기위한 다양한 방법들이 사용되어야 한다. 무중력 상태에서 재시동을 위해 아래와 같은 방법들이 연구되고 있다.

- Super critical storage system
- Centrifugal separator
- Bottoming rocket
- Expulsion system
- Capillary system
- Trap device
- Vapor-drive jet pump

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

Saturn-V 상단에 적용된 bottoming rocket은 ullage engine과 ullage motor가 적용되었다. Ullage engine은 그림 9과 같이 연료시스템(Monomethyl

hydrazine), 산화제 시스템, 점화시스템(Hypergolic, Nitrogen tetroxide), 가압시스템으로 구성되며 추력기 시스템의 각종 장치를 활용한다. Ullage engine은 J-2 엔진 점화와 coating 구간 사이에서 약 50초 동안 점화되며 J-2 엔진 재 점화전에 다시 점화된다.

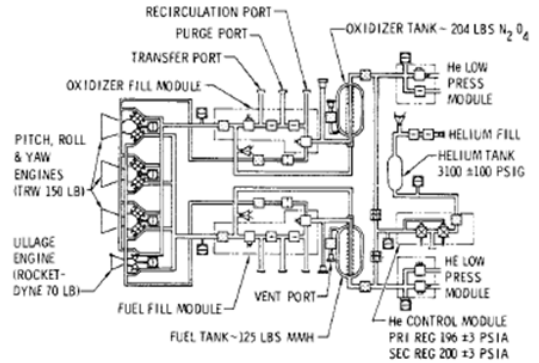


그림 9. Ullage engine of Saturn-V

Ullage motor는 그림 10과 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.[3]



그림 10. Ullage motor of Saturn-V

무중력 상태에서 가속 없이 탱크 출구에 액체만이 존재하게 하는 방식 중 모세관 현상을 이용하

는 방법이 많이 사용된다. 중력이 없는 환경에서는 표면장력이 지배적으로 작용하므로 이 힘을 이용하여 그림 11과 같이 탱크의 하부에 액체가 공급될 수 있도록 하는 장치가 사용되고 있다.[4]

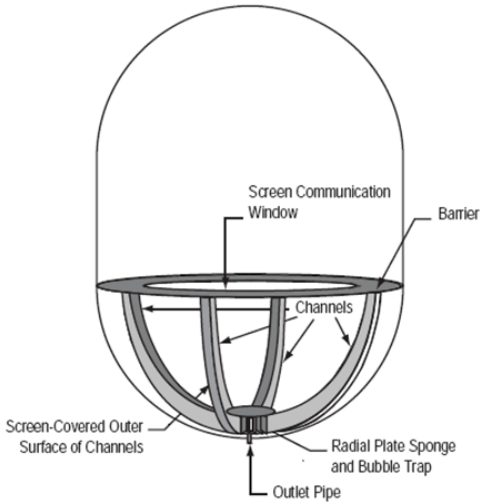


그림 11. Capillary system

4. 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 12와 같이 Joule-Thomson cooler를 이용하여 추진제를 냉각시키기 때문에 추진제의 온도 성층화를 방지하여 기화되는 것을 막을 있다. 따라서 독립적인 벤트 시스템을 구현할 수 있다.[5]

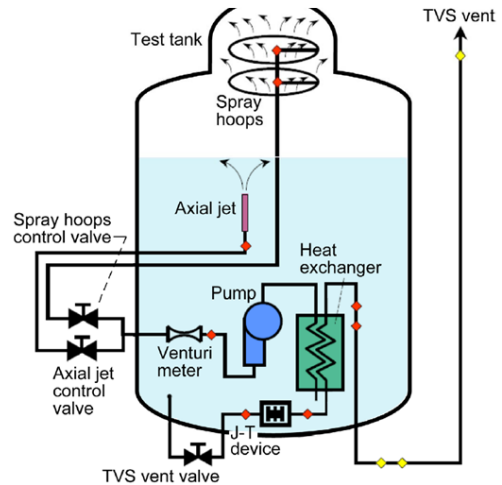


그림 12. LOX TVC system

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 13은 Delta IV에 적용된 pulse setting sequence의 전 후에 추진제의 모습을 보여준다. 추진제의 sloshing으로 인한 무게중심의 변동을 pulse setting sequence로 안정화 시키는 연구를 해오고 있다.[6]

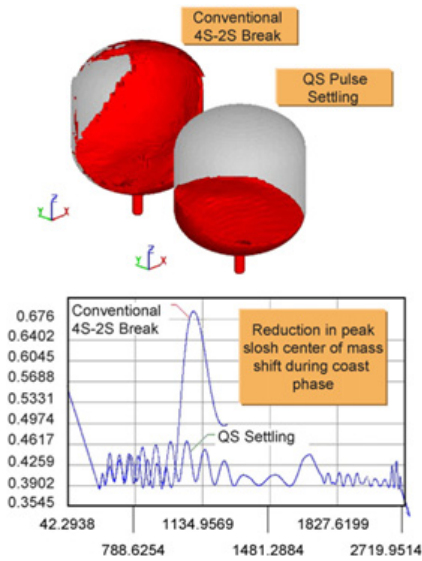


그림 13. Pulse setting sequence

4. 3 보조 동력 시스템

보조 동력 시스템을 설계할 때에는 열전달 문제를 고려해야 한다. 증기 사이클은 무중력 상태에서 비등과 응축에 문제를 안고 있다. 이에 관한 것은 앞서 논의 되었으며, 압력 손실과 계면 안정성 또한 중요한 문제가 된다.

4. 4 회전식 기계류의 유회

무중력에서 회전식 기계류에 대한 유회 문제를 해결하기 위한 다양한 방법들이 제기되고 있다. 모세관 현상 때문에 액체가 퍼지는 다공성 물질이 한 가지 해결책이다. 가스의 유회 베어링은 실험적으로 검증되었다. 외부로부터 가압된 가스 유회 베어링은 회전 속도가 높을 때 안정성을 확보하기 위해 pneumatic phase-shift network를 갖고 있다.[1]

5. 결 론

무중력 환경에서의 유체 거동은 중력장에서와 다르기 때문에 비등과 응축, 열전달, 벤트, 재시동, 유회 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 사료 된다.

참고문헌

1. Elliot Ring, "Rocket Propellant and Pressurization systems", Prentice-Hall Inc, Englewood Cliff, N. J, 1964, pp.116-152
2. David J. Chato, "The role of flight experiments in the development of cryogenic fluid management technologies", Cryogenics 46, 2006, pp.82-88
3. George C, "Saturn V news reference", Marshall space flight center, 1967
4. L.G. Bolshinskiy, "Capillary liquid acquisition device heat entrapment" Marshall space flight center, NASA/TM-2007-215074
5. Matthew E. Moran, "Cryogenic Fluid Storage Technology Development", Glenn research center, NASA/TM-2009-215514
6. Michael D. Berglund, "The Boeing Delta IV launch vehicle-pulse-setting approach for second-stage hydrogen propellant management", Acta Astronautica 61, 2007, pp.416-424