액체포집장치의 기포점 측정을 위한 변수식별

전상언* · 박수형*** · 변영화** · 정영석*** · 오승협***

Parameter identification for the bubble point measurement of Liquid Acquisition Device

Sang Eon Jeon* · Soo Hyung Park** · Yung Hwan Byun** · Youngsuk Jung*** · Seung Hyub Oh***

ABSTRACT

Liquid acquisition device in the liquid propellant supply system is required to protect entrance of gas bubble into the propulsion system. The device exploits the capillary effect of micro-sized poles in a screen and supplies pure liquid-phase propellant to the propulsion system. The bubble point is the most important performance parameter in the design of a liquid acquisition device. In this paper, performance parameters affecting the bubble point are identified through literature survey, in order to develop the experimental setup for the bubble point measurement.

추 로

액체추진제 공급시스템의 액체포집장치는 추진기관으로 기포가 유입되는 것을 방지하는데 사용한다. 액체포집장치는 차단막의 미세 구멍의 모세관 효과를 이용하여 추진기관에 순수 액체만을 공급한다. 기포점은 액체포집장치의 설계에서 가장 중요한 설계변수이다. 본 논문에서는 문헌조사를 통해 액체포 집장치의 성능에 영향을 미치는 변수들을 식별하고 기포점 측정 시험 장치를 구성하였다.

Key Words: Liquid Acquisition Device(액체포집장치), Bubble Point(기포점), Surface Tension(표면장력), Capillary Effect(모세관 효과), Micro Gravity(미소중력)

1. 서 론

일반적인 중력 환경에서는 액체와 기체의 밀 도차로 인하여 액체의 출구를 액체 보관 장치 하부에 장착하면 출구 장치에서 기포 유입의 문제가 발생하지 않는다. 하지만 지구 궤도에서 운용되는 액체 추진 기관의 경우 무중력 혹은 미소중력 상황에 놓이게 되고 따라서 중력 하에서무시되었던 표면장력(surface tension), 응집력(cohesion), 부착력(adhesion)과 같은 분자력이중요해지며 연료 탱크 내부의 유체가 외부 자극에 따라 자유롭게 움직이게 된다. 따라서 추진제

^{*} 건국대학교 대학원 항공우주정보시스템공학과

^{**} 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

[†] 교신저자, E-mail: pish@konkuk.ac.kr

^{***} 한국항공우주연구원, 발사체추진기관팀

를 공급하는 공급 시스템에 기포가 포함될 수 있고 연소 시스템에 기포가 직접 유입 될 경우 여러 가지 문제를 야기할 수 있다[1]. 이러한 현상을 배제하고 액체 상태의 연료만을 추진 시스템에 공급하기 위해서는 별도의 장치가 필요하게 된다. 이때 연소 시스템에 단상(single phase)의 액체 연료를 공급하기 위해 보편적으로 사용하는 장치가 액체포집장치(LAD, liquid acquisition device)이다[2-4].

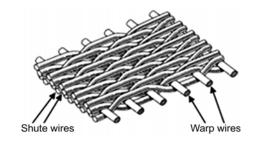
LAD는 모세관(capillary) 현상을 이용하여 기 체를 배제하고 액체만을 스크린(screen)을 통해 통과 시킨다. 이때 모세관 효과로 기체를 배제할 수 있는 압력의 한계 값을 기포점(bubble point) 이라고 한다. 기포점에 영향을 미치는 중요한 변 수들로 해당 유체의 표면장력과 접촉각(angle of contact), 유체가 통과하는 단면의 크기를 들 수 있다. 표면장력은 열역학적인 정의에 의하면 변 하지 않는 압력, 온도 조건에서 단위 면적당 깁 스 자유에너지(Gibbs free energy)를 뜻하므로 액체 로켓에서 사용하는 연료와 같이 낮은 온도 에서 고압으로 압축되어 있는 경우 해당 조건을 고려해야 한다. 접촉각은 액체면과 고체면이 이 루는 각을 뜻하며 이 접촉각에 따라 확산하는 액체(wetting liquid)와 확산하지 않는 액체 (non-wetting liquid)로 나누어진다. 따라서 LAD 구성에 있어 위와 같은 변수들을 고려함은 물론 기포점에 영향을 미치는 인자들을 확인할 필요 가 있다.

본 논문에서는 LAD에 대한 물리적 현상과 중 요한 변수들을 다루고 지금까지 연구되었던 연 구 사례들을 분석한다. 이를 통해 기포점의 측정 을 위한 실험 장치를 제안하고자 한다.

2. 본 론

2.1 Liquid Acquisition Device(LAD)

LAD의 물리적 현상에 대한 고찰에 앞서 LAD의 형태 및 기능에 대한 설명을 하고자 한다. LAD는 오래전부터 여러 가지 형태로 고안되어 왔으며 좁게는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 스크



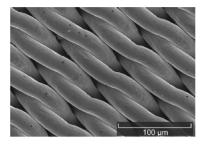


Fig. 1 Twill Dutch Screen [4]

린(screen)을 직접 지칭한다.

이러한 스크린의 재질은 대표적으로 스테인리스스틸(stainlesssteel)과 알루미늄(aluminum)을사용하며, 이유는 다음과 같다. 액체 로켓과 같은 곳에서 사용되는 연료는 대부분 유독성의 물질이며 저온, 고압의 상태로 보관된다. 따라서 이러한 조건에서 LAD의 재료가 장시간 견뎌내야하고 변형정도가 성능에 큰 영향을 미치지 않는 범위여야 한다. 이런 요구조건을 만족시키는 대표적인 재료가 앞서 언급한 스테인리스 스틸과알루미늄이다. 알루미늄의 경우 스테인리스 스틸에 비해 보다 가볍고 성긴(coarse) 스크린에 사용된다. 스테인리스 스틸은 촘촘하며(fine) 높은 강도가 요구되는 경우에 사용하며 가장 보편적으로 사용하고 있다.

재료 못지않게 조직 방법 또한 중요하다. 스크 린이 유체의 압력에 영향을 받아 변형을 일으키 면 스크린을 통과하면서 추가적인 압력 손실이 발생하는 것으로 알려져 있다[5]. 따라서 이러한 현상을 방지하기 위하여 여러 가지 형태의 보완 책이 구상되는데 Fig. 2와 같이 촘촘한 스크린과 성긴 스크린을 섞어서 조직하는 방법 등이 있다.

Figure 3은 상단 로켓인 Saturn에서 사용된 Start Basket을 나타낸다[6]. Fig. 1에 표현한 스 크린을 포함하고 있는 형태로 상단 로켓 Centaur의 경우 역시 비슷한 형태의 LAD 시스 템을 사용하고 있다. 더욱 포괄적으로는 추진제 를 전반적으로 관리하는 시스템을 포함하여 Propellant Management Device(PMD)라고 부르 기도 한다.

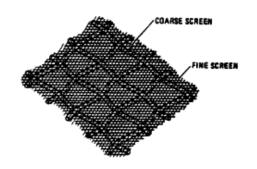


Fig. 2 Coarse Screen Backup [6]

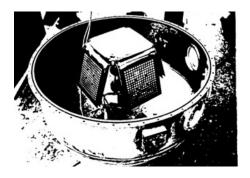


Fig. 3 Saturn Start Basket [6]

2.2 기포점 (Bubble Point)

기포점은 LAD의 성능을 평가할 수 있는 가장 중요한 변수로 오래전부터 이와 관련된 여러 연구가 수행 되었다. 기포점이란 스크린 위 액체의 표면장력을 이겨내고 스크린을 통과하기 위한 압력 차이를 뜻하며 중요한 변수로 접촉각, 표면 장력, 유체가 통과하는 구멍의 크기가 있다. 이러한 기포점은 Young - Laplace 식을 모세관에 적용하여 얻을 수 있고 Eq. 1과 같이 나타낸다.이 식은 유체표면을 지나면서 변하는 압력을 뜻하고 여기서 R은 접촉각 및 모세관의 지름으로 표현할 수 있다.

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} \tag{1}$$

 γ : 액체의 표면장력 R: 구형 표면의 곡률

기포점은 관점에 따라 그 표현이 약간씩 달라지만 기본적으로 위에서 언급한 것과 같이 접촉각, 표면장력 등의 함수이며 아래 Eq. 2와 같이 다시 쓸 수 있다. 식에서 볼 수 있듯이 유체가 통과하는 단면의 직경 또한 중요하며 이것은 스크린의 조밀도에 따라 달라진다[2-4].

$$\Delta P_{BP} = \frac{4\sigma \cos\theta_c}{D_p} \tag{2}$$

 σ : 액체의 표면장력

 θ_c : 접촉각

 D_{0} : 유체가 통과하는 단면의 직경

보다 확실히 단상(single phase)의 유체를 통과시키기 위해서는 높은 기포점을 얻어야 하며 이것은 스크린의 조밀도가 높아져야 한다는 것을 의미한다. 하지만 스크린의 조밀도가 높아지면스크린 통과후의 전압력 손실이 크게 되고 이러한 전압력 손실은 액체의 기화(evaporation)를 유발할 수 있다. 따라서 실제 적용에 있어 스크린 조밀도와 기포점 간의 균형을 잘 맞춰야 하며 스크린의 조밀도에 따라 기포점을 예측하고

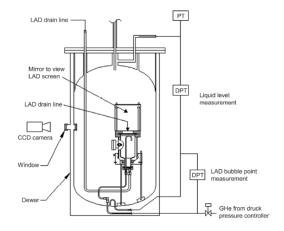


Fig. 4 LAD test article shown inside dewar [3]

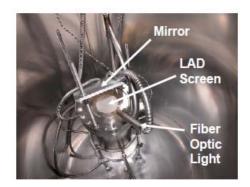


Fig. 5 Test article installed inside cryogenic dewar [4]

측정을 통해 검증할 필요가 있다.

지금부터 기술할 내용은 기포점 측정을 위한 실험에 관한 것이다. Fig. 4는 LAD가 있는 Receiver Dewar의 개략도이며 Fig. 5는 스크린 을 장치한 주위의 모습을 나타낸 것이다[4].

이 실험은 Receiver Dewar와 Supply Dewar 두 개를 각각 구성하여 Receiver Dewar에 기포점을 측정할 LAD 장치를 장착한다. 이렇게 구성된 Dewar를 이용하여 NBP(normal boiling point)와 과냉각된(subcooled) 조건의 유체를 각각 얻을 수 있다. Receiver Dewar로 직접 극저온 유체를 공급하는 경우에는 NBP 조건이며 Supply Dewar를 통해서 오는 경우 압력 감소를 일으켜 과냉각된 극저온 유체를 만든다.

실험 과정은 Receiver Dewar 내부에 실험할 극저온 유체를 채우고 LAD 장치 아래쪽에서 헬

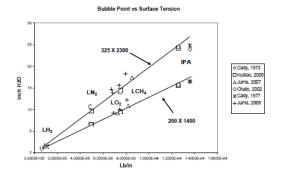


Fig. 6 Summary of Historical Bubble Point Data [3]

Table 1. Predicted and Measured Bubble Point Pressures [4]

Fluid	Surface tension (lb/in.)	$\begin{array}{c} \Delta P_{BP} \\ measured \\ (in. \ H2O) \end{array}$	ΔP _{BP} Predicted, (in. H2O)	Source
LH ₂	6.526E-06	1.216	1.285	Cady, 1973
IPA	1.359E-04	23.9		Cady, 1973
LH ₂	1.087E-05	1.44	2.14	Cady, 1977
IPA	1.359E-04	24.8	26.75	Cady, 1977
IPA	1.256E-04	24.54	24.73	Chato, 2002
LN ₂	4.888E-05	10.67	9.62	Chato, 2002
LH ₂	1.028E-05	1.83	2.02	Chato, 2002
LN ₂	4.996E-05	9.6	10.7	Kudlac, 2005
LO ₂	7.537E-05	14.5	14.11	Kudlac, 2005
IPA	1.256E-04	24.18		Kudlac, 2005
NBP LCH ₄	7.463E-05	14.11	14.59	Jurns, 2007
Subcoo led LCH ₄	8.524E-05	17.37	16.66	Jurns, 2007

륨 가스를 주입한다. 이 과정에서 스크린 전후의 압력 차이 측정 및 카메라로 촬영한 동영상을 동기화하여 기록한다. 헬륨 가스의 기포가 올라 오는 것을 멈추고 난 후 다시 가압하여 기포 방 울이 보이는 지점의 압력 차이를 기포점이라 기 록한다.

Figure 6과 Table 1은 기포점의 실험 값 및 계산 값을 정리 한 것이다. Table 1을 살펴보면 유체의 종류 및 표면 장력에 따라 기포점이 달라지는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 표에서 식을 사용한 계산 값이 실험값을 잘 따라가는 것을 통해 기포점을 정의한 식이 타당하다는 것을 확인하였다. Fig. 6의 두 가지 선은 각각 스크린의조밀도에 따른 결과를 표기한 것으로 그림에서알 수 있듯이 조밀한 스크린의 경우 더욱 높은기포점이 측정되는 것을 볼 수 있는데, 이는 Eq. 2에서 나타난 유체가 통과하는 단면과 기포점이반비례 관계에 있다는 것을 입증해주는 결과라할 수 있다. 따라서 기포점에 표면장력, 스크린단면 직경의 크기가 영향을 미치게 되며 이것은

목적하는 기포점이 있을 경우 사용하는 스크린의 조밀도나 유체의 표면장력에 따라 LAD가 설계 되어야 한다는 것을 의미한다.

2.3 표면장력

앞에서 기포점 실험을 살펴본 결과를 따르면 중요한 변수중의 하나로 표면장력을 들 수 있었 다. 전술하였듯이 표면장력은 압력과 온도에 관 한 함수이다. 따라서 압력과 온도에 따라 표면장 력이 어떻게 변화하는지 살펴본다.

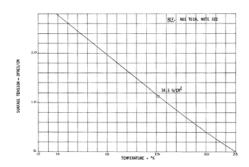


Fig. 7 Surface Tension of Para-hydrogen [7]

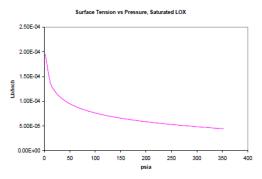


Fig. 8 Surface Tension vs. pressure for saturated LOX [3]

Figure 7은 파라수소(Para-hydrogen)가 온도에 따라 표면장력이 어떻게 변하는지를 나타낸 것이다[7]. 그림에서 확인할 수 있듯이 약 5K의 온도 변화로 두 배에 가까운 표면장력의 변화가나타난다. 이것은 저온에서 표면장력이 온도에 관해 민감함을 뜻하며, 기포점 역시 온도에 따라 큰 변화가 있을 것이라고 유추할 수 있다. 마찬

가지로 압력에 따라 표면장력이 어떻게 변하는지 살펴보자. Fig. 8은 포화된 액체산소의 압력에 따른 표면장력의 변화를 나타낸 것이다[3]. 그림에서 볼 수 있듯이 낮은 압력에서는 변화폭이 비교적 크지만 일정 이상 압력에서는 변화의 크기가 크지 않다. 따라서 액체 로켓에서 쓰이는 극저온 추진제나 산화제와 같이 고압 상태를 유지하는 경우 압력에 따른 표면장력의 변화는 크게 고려치 않아도 될 것으로 판단된다.

2.4 접촉각

앞선 Eq. 2를 다시 살펴보면 기포점이 표면장력, 접촉각, 유체가 통과하는 단면의 직경에 관한 함수임을 알 수 있다. 유체가 통과하는 단면의 직경은 기포점 실험에 관하여 기술하면서 스크린의 조밀도에 따라 관계가 있다는 것을 이미 언급하였고 단면의 크기가 작아지면 기포점이 증가하는 것을 이미 확인하였다. 표면장력은 앞서 살펴 본 것과 같고 마지막으로 접촉각에 대하여 알아볼 필요가 있다. 접촉각은 일반적으로 온도, 시간, 부피, 밀도, 액적의 크기, 표면 거칠기 및 중력 등에 영향을 받는다[8].

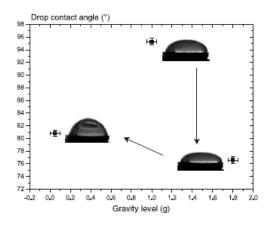


Fig. 9 Water drop contact angle on PTFE during a parabola [9]

Figure 9는 중력이 바뀌면서 접촉각이 바뀌는 모습을 나타낸 것이다[9]. 하지만 액적의 크기가 일정이하인 경우 중력의 영향은 무시할 수 있다 고 알려져 있다. 본 연구에서 다루는 스크린의 경우 단일 구멍의 크기가 수십 μm 에 불과 하여 중력의 영향을 고려치 않아도 될 것으로 판단한 다.

액적의 크기가 매우 작고 중력이나 시간 등을 고려치 않을 때 접촉각은 표면장력의 함수로 나 타낼 수 있다. Eq. 3은 Young Dupré equation으 로 여기서 하첨자 sg, sl, lg는 각각 고체-기체, 고체-액체, 액체-기체의 접점을 뜻한다.

$$\gamma_{sg} - \gamma_{sl} = \gamma_{lg} \cos\theta \tag{3}$$

이와 같이 접촉각은 표면장력에 따라 정해지 며 따라서 다른 인자들보다 표면장력의 변화를 우선적으로 고려할 필요가 있다. 표면장력에 영 향을 주는 인자들은 앞서 다룬 바 있다.

2.5 기포점 실험

지금까지 LAD 성능에 가장 중요한 기포점과 그에 영향을 미치는 인자들에 대해 살펴보았다.

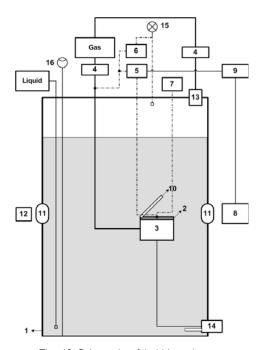


Fig. 10 Schematic of bubble point test

Table 2. Specification of parts

No.	Part	Specification
1	Dewar	20cm×50cm (diameter×deep)
2	Screen	5cm(wetted area:3cm)
4	Pressure controller	1 step : 25Pa
5	DPT	accuracy : 25Pa
7	Thermocouple	accuracy : 1℃
8	Camera	High resolution

본 논문에서는 이를 토대로 참고문헌 [2-4]와 유사한 형태의 기포점 실험을 하기 위한 실험 장치 설계안을 제시하고자 한다. Fig. 10은 실험 장치에 대한 개략도를 나타낸 것이다.

참고문헌[2-4] 상에서는 액체 메탄과 같은 극저 온 유체를 사용하였으나 본 연구에서는 그에 앞서 상온에서의 실험을 첫 단계로 수행하고자 한다. Fig. 10에서 나타낸 중요 부품들의 요구 조건을 Table 2에 정리 하였다. 실험의 목적이 압력 차이를 측정하는 것이므로 가스 압력 조절기나 DPT(differential pressure transducer)의 정교함이 요구 된다. 특히 DPT의 한쪽은 스크린 바로 위쪽 액체 부분의 압력을 측정해야 한다. 스크린의 경우 단일 구멍의 직경이 수십 μm 에 불과 하므로 그에 따른 기포 크기 또한 이 범위를 넘어서지 않을 것으로 판단되며 이를 촬영하는 카메라의 주요 요구 조건은 고해상도이다. 또한, DPT와 카메라의 경우 동기화하여 기록한다.

실험에 대해 간략히 설명하면 다음과 같다. 스크린과 그 주변 장치를 탱크 내부에 설치 한 뒤탱크 내부의 압력 보다 약간 높은 압력의 가스를 스크린 아래쪽에 공급 해준다. 이는 탱크에액체를 채울 시 발생 할 수 있는 스크린 아래쪽의 침수를 막기 위함이다. 이후 탱크 내부에 액체를 채운 뒤 스크린 위에서 기포 방울이 보이지 않을 때 까지 가스의 압력을 서서히 줄여 나간다. 이후 가스를 다시 가압하여 스크린 위에서 기포 방울이 보이면 이때의 DPT를 통해 측정

된 압력 차이를 기포점으로 기록한다. 앞서 언급 하였듯이 실험 과정에서 DPT와 카메라의 영상 은 동기화하여 기록하게 된다.

위와 같은 실험을 통해 기포점 실험의 기본적 인 특징을 파악하고 검증할 계획이다. 이후 작동 유체의 온도 및 압력 변화가 실제로 기포점에 미치는 영향을 확인하고 더 나아가 극저온 유체 나 무중력과 같은 실제 조건에서 실험이 이루어 진다면 최종적인 검증을 할 수 있을 것으로 기 대한다.

3. 결 론

지금까지 LAD에서 일어나는 물리적인 현상과 주요 변수들에 대해서 검토해 보았다. LAD가 필요한 환경이 일반적인 중력 환경과는 차이가 있고 추진제나 산화제등의 작동 유체가 저온 고압 상태에 있기 때문에 LAD 시스템 구축이나 제작에 앞서 제작 방법이나 재질 등의 많은 것들을 고려해야 한다. 특히 LAD 성능을 대표적으로 나타내는 기포점은 표면장력, 접촉각, 스크린 구멍의 크기의 함수이므로, 표면장력에 영향을 미치는 온도 및 압력을 고려해야 하며 표면 장력에 따라 변하는 접촉각의 변화 또한 확인해야 한다. 그리고 스크린의 조밀도에 따라 변하는 스크린 구멍의 크기 또한 정확히 알아야 기포점의 측정 및 예측이 잘 수행 될 것이다.

접촉각은 중력과 무관하지는 않지만 액체포집 장치의 기포점 측정에서는 중력의 영향을 무시 할 수 있다. 따라서 LAD 실험의 경우 지상 실 험에 기초할 수 있으며[10] 이후 무중력 실험을 통해 최종적인 검증을 할 수 있을 것으로 판단 한다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원 학연협력강화 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니 다.

참 고 문 헌

- 정영석, 조규식, 오승협, 정상권, "한국형 발사체 3단 추진기관의 핵심 개발 필요 시스템," 2010, 제 11회 우주발사체기술 심포지움.
- 2. Chato, D.J. and Kudlac, M.T., "Screen Channel Liquid Acquisition Devices for Cryogenic Propellants," Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, NASA/TM -2005-213638.
- 3. Jurns, J.M., and McQuillen, J.B., "Liquid Acquisition Device Testing with Sub-Cooled Liquid Oxygen," AIAA-2008-4943
- 4. Jurns, J.M., and McQuillen, J.B., "Bubble Point Measurements With Liquid Methane of a Screen Capillary Liquid Acquisition Device,", NASA/TM 2009-215496.
- 5. Blatt, M.H., and Walter, M.D., "Centaur Propellant Acquisition System Study," Lewis Research Center, Ohio, 1975, NASA CR-134811.
- Fisher, M.F., "Propellant Management in Booster and Upper Stage Propulsion Systems," 1997, NASA-TM-112924
- 7. Cady, E.C., "Study of thermodynamic vent and screen baffle integration for orbital storage and transfer of liquid hydrogen" 1973, NASA CR-134482.
- 8. 성미린, 이계영, 조 형, 임현우, 박진구, 이선 영, "C₄F₈ precursor를 이용한 점착 방지막용 FC (fluorocarbon) 박막의 최적화에 대한 연 구," Journal of Engineering & Technology, Vol.18, 2008, pp.37-44.
- Brutin, D., Zhu, Z.Q., Rahli, O., Xie, J.C., Liu, Q.S., and Tadrist, L. "Sessile Drop in Microgravity: Creation, Contact Angle and Interface," Microgravity Science and Technology, Vol.21, 2009, pp.67-76.
- 10. Dodge, F.T., "The Applicability of Surrogate Fluids for Ground Testing of

Cryogenic Propellant Fluid Management Components," 2006, Final Report, Southwest Research Institute Project No. 18-11969.