

순간 해석 기법을 이용한 PVT 잔량 측정법의 극저온 균일 온도 조건에서의 실험적 연구

Experimental research of Pressure-Volume-Temperature mass gauging method using instantaneous analysis under cryogenic homogeneous condition

서만수^{1,*}, 정상권², 정영석³, 구동훈⁴, 지동진⁵

Mansu Seo^{1,*}, Sangkwon Jeong², Young-suk Jung³, Donghun Ku⁴, Dongjin Ji⁵

Abstract: In the extreme conditions of launch vehicle in a space, such as cryogenic temperature and low-gravity environment, the mass gauging of remaining propellants becomes a difficult problem. Pressure - volume -temperature (PVT) method is one of the attractive mass gauging methods under low-gravity due to its simplicity and reliability. PVT gauging experiment with various mass flow rates of helium injection is carried out with the experimental apparatus creating cryogenic homogeneous condition as the condition of low-gravity. Experimental results are analyzed by a novel PVT gauging analysis method which considers all instantaneous changes of pressure and temperature in the ullage volume with small time intervals. It is observed that the gauging error from the novel PVT gauging analysis is -0.11% with 2 slpm mass flow rate of helium injection.

Key Words: Mass gauging, PVT mass gauging, low gravity, microgravity.

1. 서 론

액체 연료 우주 로켓 발사체의 경우 수백 톤의 무게에서 약 90%의 높은 비율을 연료 및 추진제가 차지하고 있기 때문에 추진제 총량 대비 1% 수준의 충전량 차이는 수 톤의 무게 차이를 유발한다. 따라서 경제적인 관점에서뿐만 아니라 설계 효율 향상의 관점에서 볼 때 초기 추진제 충전량의 최적화는 반드시 수행되어야 한다. 추진제 사용량을 미리 예측하는 것은 매

우 어렵기 때문에 발사체의 비행 종료 후 추진제 잔량을 계측하여 추진제의 실사용량을 파악하는 방식이 필요하다. 또한 이원 추진제 시스템 (bipropellant system)에서는 잔량 정보를 이용하여 추진 단계에서 추진제를 선택적으로 가압해 연료와 산화제의 소비 속도를 조절할 수 있기 때문에 최종 추진제 잔량을 줄이고, 비행시간을 늘일 수 있다[1]. 이와 같은 이유들로 인하여 최근 액체 추진제 로켓의 비행 중 추진제 잔량 계측의 필요성은 강조되고 있다. 저중력 상태에서는 지상에서와 달리 유체의 부착력, 응집력, 표면 장력 등이 유체의 거동에 매우 큰 영향을 미치므로 추진제 탱크내의 상부 가압가스와 하부 액체 추진제가 명확하게 분리되지 않는다[2]. 또한 발사체에서 사용되는 액체 추진제는 일반적으로 극저온 유체로 온도가 매우 낮다. 반면 가압 가스로 사용되는 헬륨은 상온 또는 가열된 고온 상태로 주입되므로 탱크 내부에서는 열적 비평형 (thermal non-equilibrium) 상태가 일어나며 이는 극저온 추진제의 잔량 계측을 더욱 어렵게 한다. 이와 같이 일반적인 중력, 상온 상황과 매우 다른 저중력, 극저온과 같은 극한 상황에서의 추진제 잔량 측정에는 기존 방법과 다른 측정법이 적용되어야 한다.

PVT 잔량 측정법 (pressure-volume-temperature mass gauging method)은 추진제 탱크 내부에 헬륨 기체와 같은 가압제를 주입하여 가압한 후 측정된 탱크 내부의 온도, 압력 변화와 주입된 헬륨의 질량을 이용하여 추진제의 부피를 계산한 후 질량으로 환산하는 방식으로써 그 원리가 매우 단순하여 연구 및 기초 기술로써 접근성이 뛰어나다. 무엇보다도 PVT 잔량 측정법의 가장 큰 장점은 액체 연료 추진제 사용되는 기존의 가압 설비를 이용하므로 추가적으로 필요한 계측 장비를 최소화할 수 있다는 점이다 [3]. 극저온 펌프 및 스프레이를 사용하여 탱크 전체를 포화 균일 상태로 만드는 PVT 잔량 측정법에서는 저온 추진제의 증기압이 온도에 민감하므로 내부 추진제의 포화 증기압 측정이 정확하게 이루어져 잔량 측정에서 높은 정확성을 얻을 수 있었다[4]. 하지만 이러한 방식에서는 극저온 펌프 및 스프레이 설비로 인하여 PVT 잔량 측정법의 가장 큰 이점인 추가 설비 최소화가 이루어지지 않는다. 최근 추가적인 펌프 및 스프레이 장치가 없이도 낮은 헬륨 주입 유량 및 기체 부를 이성분 혼합물로 고려하는 PVT 잔량 측정 해석법을 적용하여 다양한 액체 질소 충전 조건에서 높은 정확성을 얻을 수 있는 연구가 수행되었다[5]. 하지만 액체 질소 충전 조건에 따라 낮은 헬륨 주입 유량과 이성분 혼합물로 고려하는 해석법의 적용에 따른 측정

¹학생회원 : KAIST 기계공학과 통합과정
²정 회 원 : KAIST 기계공학과 교수
³비 회 원 : 항공우주연구원 선임연구원
⁴비 회 원 : KAIST 기계공학과 학부과정
⁵비 회 원 : KAIST 부속 한국과학영재고등학교

*교신저자 : hipana@kaist.ac.kr
원고접수 : 2011년 10월 13일
심사완료 : 2012년 03월 13일
게재확정 : 2012년 03월 13일

오차의 경향이 다르게 나타났으며, 이러한 기법의 적용에 대한 정량적인 기준이 제시되지 않아 실제적인 추진제 잔량에 있어서는 한계가 있었다.

본 연구에서는 저중력 환경에서도 항상 적용될 수 있는 개선된 PVT 잔량 측정법을 제시하고자 한다. 이를 위해 PVT 측정법의 측정 오차를 발생시키는 근본적인 문제점을 찾기 위한 실험적 변수를 줄인 외부 냉각만을 통한 극저온 균일 온도 조건의 실험 환경에서의 PVT 방식의 부피 측정 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 얻은 측정 오차와 탱크 내부의 수직 온도 분포가 가압 시간 및 헬륨 주입 유량에 따라 어떻게 변화하는지를 관찰하였다. 또한 헬륨 주입 유량, 저장 탱크 내부의 압력 변화, 그리고 PVT 측정 오차를 과도적으로 분석하여 지금까지 언급되지 않았던 PVT 측정 오차 발생의 원인을 파악하였다. 이를 바탕으로 정확성 향상을 위한 새로운 순간 해석 기법의 PVT 잔량 측정법 (instantaneous analysis of PVT mass gauging method)을 제시하여 개선된 잔량 측정을 수행하였다.

2. PVT 잔량 측정법 소개 및 실험 장치

2.1. PVT 잔량 측정법

PVT 잔량 측정의 원리는 다음과 같다[6]. 우선 최종적으로 측정하고자 하는 저장 탱크 내부의 액체 추진제의 부피, V_l , 은 저장 탱크 전체 부피, V_t , 와 탱크 내부의 기체부의 부피 (ullage volume), V_u , 로 표현된다.

$$V_l = V_t - V_u \quad (1)$$

V_t 는 설계 과정을 통하여 알고 있으며 V_u 는 기체 부에 존재하는 기체의 질량과 밀도를 이용하여 추정한다. 탱크 내부의 기체부는 극저온 액체 추진제가 증발한 기체 추진제와 가압제로 외부에서 유입된 헬륨 기체가 각각 P_v 와 P_{He} 의 분압으로 동시에 존재하는 이성분 혼합물 상태이다. 기체부가 이상 기체 상태로 존재한다고 할 때, 저장 탱크 내부의 기체는 '고정된 균일한 온도와 부피에서의 혼합 기체의 전체 압력은 혼합 기체의 각 기체 성분의 분압의 합으로 존재한다'는 돌턴의 분압 법칙 (Dalton's law)이 적용된다. 따라서 기체부의 전체 부피를 혼합 기체의 질량과 밀도가 아닌 하나의 기체 성분, 즉 가압 기체인 헬륨의 질량, m_{He} , 와 추진제 저장 탱크 내의 헬륨의 밀도, ρ_{He} , 를 통하여 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$V_u = m_{He} / \rho_{He} \quad (2)$$

헬륨 기체를 추진제 저장 탱크에 주입하기 전인 초기 조건 상태에서 저장 탱크의 기체부에 헬륨이 없다고 할 경우, 주입 후의 추진제 탱크 내부의 m_{He} 는 주입한 헬륨의 총량과 같다. 따라서 m_{He} 은 질량 유량계를 통하여 측정된다. 추진제 저장 탱크 내의 ρ_{He} 는 저장 탱크 내부의 헬륨 분압, P_{He} , 와 측정된 기체 온도를 이용하여 계산 가능하다. ρ_{He} 는 미국 표준 기술 연구소 (NIST)에서 개발, 배포하는 물성치 데이터 베이스 프로그램인 REFPROP 7.0에서 제공한 함수를

사용하여 계산하였다. P_{He} 는 식 (3)과 같이 돌턴의 분압 법칙을 이용하여 전체 압력, P_t ,에서 추진제의 분압, P_v , 을 빼면 구할 수 있다.

$$P_{He} = P_t - P_v = P_t - P_{v,i} \quad (3)$$

내부 추진제 증발 기체가 매우 작아 무시할 수 있다고 가정하면 P_v 는 초기 추진제 분압, $P_{v,i}$ 를 적용할 수 있다. 일련의 과정을 통하여 V_l 를 구하면 PVT 측정 오차는 다음과 같이 계산된다.

$$PVT \text{ gauging error } (\%) \quad (4)$$

$$= (V_l - V_{l,true}) / V_t \times 100$$

2.2. 실험 장치 및 조건

Fig. 1은 액체 질소를 이용한 PVT 유체 잔량 측정법의 실험 장치를 개략적으로 나타내고 있다. Fig. 1의 (a)는 전체적인 실험 장치를 보여주고 있다. 실험

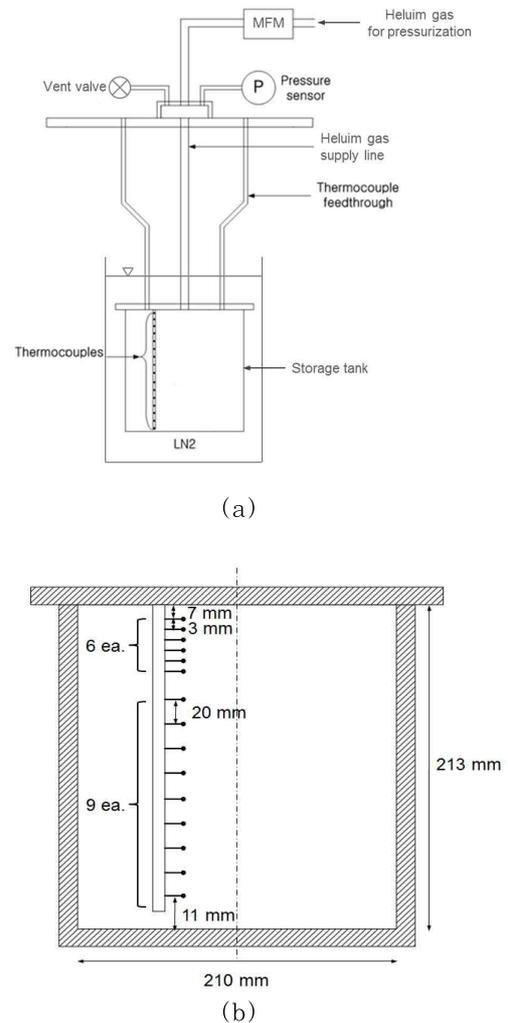


Fig. 1. Schematic diagram of PVT experimental apparatus: (a) assembly of whole experimental apparatus (b) detailed locations of temperature sensors in the tank.

장치는 저장 탱크, 기체 헬륨 주입 튜브, 압력 센서, 저장 용기 내부의 온도 센서, 열식 질량 유량계, 온도 센서 피드스루 (feedthrough)로 구성된다. 추진제 저장 탱크를 모사하는 저장 탱크는 스테인레스 스틸로 제작되었으며 지름 200 mm, 높이 213 mm의 원통형으로 7.4 L의 부피를 가지고 있다. 가압 기체인 헬륨의 주입 질량을 측정하기 위한 질량 유량계는 열식 질량 유량계로써 최고 측정 범위가 10 slpm (standard liter per minute)이며 전체 범위 대비 $\pm 0.1\%$ 의 측정 오차를 가진다. 헬륨 기체 가압을 통한 저장 탱크의 압력 변화를 측정하는 압력 센서는 300 kPa (절대압)의 측정 범위를 가지며, 측정 오차가 전체 범위 대비 $\pm 0.1\%$ 이다. 저중력 상태에서는 상하부 온도 차이가 작아 극저온 열적 평형 상태에 가까우며 열적 성층화 (thermal stratification) 현상이 매우 약하게 일어나므로 자연 증발 (boil-off) 이 작게 발생한다(3). 본 연구에서는 이러한 저중력 환경의 저장 탱크 내부 상태를 모사하기 위하여 Fig. 1의 (a)와 같이 저장 탱크가 액체 질소가 채워진 저장 용기에 완전히 잠기게 하였으며 내부에는 극저온 액체를 주입하지 않았다. 저장 탱크 내벽은 77 K의 균일한 극저온 온도 경계 조건을 가진다. 그리고 극저온 액체를 주입하지 않았으므로 식 (4)의 저장 탱크 내부의 극저온 액체의 부피를 의미하는 식 (4)의 $V_{l,true}$ 는 영 (0)의 값을 가진다. Fig. 1의 (b)는 가압 용기 내부에 설치된 온도 센서의 위치를 보여주고 있다. 온도 센서는 ± 1.0 K의 정확도를 지닌 E 타입 열전대이다. 저장 탱크 내부의 전체 수직 온도 분포를 측정하기 위하여 탱크의 상단부에는 헬륨 주입부 부근의 상세한 온도 측정을 위하여 3 mm의 간격으로 6개의 열전대, 그 아래로는 20 mm의 간격의 9개의 열전대를 설치하였다.

실험 방법 및 조건은 다음과 같다. 초기 압력은 저장 탱크를 진공 펌핑한 후 질소를 충전하는 방식이었다. 초기 온도가 38- 40 KPa (절대압)이 되도록 설정하였다. 초기 온도 조건은 액체 질소를 이용한 탱크 외부 직접 냉각으로 저장 탱크 내부의 모든 기체가 77.5 K의 균일한 온도 상태로 만든다. 초기 압력이 대기압보다 낮은 이유는 질소의 응축을 방지하기 위해서이다. 초기 헬륨 분압은 0 kPa (절대압)이다. 초기 조건 설정 후, PVT 잔량 측정법을 위한 헬륨 기체 가압을 2, 6, 10 slpm의 유량으로 수행한다. 기체 헬륨 주입 튜브를 통하여 저장 탱크 내부로 주입 되는 헬륨 기체의 질량 유량은 열식 질량 유량계를 통하여 측정된다. 주입되는 동안의 저장 탱크 내부의 압력, 온도 변화 또한 해당하는 센서를 통하여 측정된다. 가압 시간은 모든 실험에서 약 300 초가 소요되었다. 각 유량 조건마다 실험은 2회씩, 총 6회 수행되었다.

본 실험 장치에서 저장 탱크 부분을 제외한 기체 헬륨 주입 튜브와 피드 스루의 불용 체적은 탱크 부피의 2.8%를 차지하므로, PVT 해석에서는 불용 체적이 포함된 부피를 V_t 로 사용하였다. 이는 불용 체적 부분에서도 헬륨 및 기체 질소가 균일한 이성분 혼합물 상태로 존재한다는 가정을 적용된 것이다. 또한 액체 질소에 잠겨있는 저장 탱크의 전체 부피는 상온의 전체 탱크 부피에 비해 약 0.9%의 수축률이 발생하므로, 이 수축률을 V_t 에 적용하였다(4).

3. 기존 PVT 잔량 계측법의 실험 결과

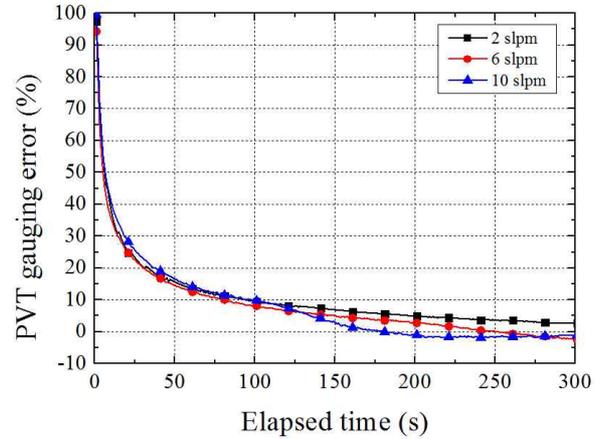


Fig. 2. Transient curves of PVT gauging error by the helium injection with various mass flow rates.

Fig. 2는 헬륨 기체를 다양한 질량 유량으로 가압한 경우에 대한 PVT 계측 오차의 변화를 가압 시간에 따라 나타내고 있다. 모든 유입 유량에 대하여 헬륨 가압 초기에는 약 100% 수준의 매우 높은 오차가 발생하고 이후 오차가 급격하게 감소하여 수백 초가 지난 후 영 (0)의 값으로 수렴하는 경향이 공통적으로 나타난다. 가압 직후 구간에서는 초기 상태 (가압 시작 시점)와 비교하여 탱크 내부의 온도 변동이 작지만 오히려 측정 오차는 매우 큰 값을 나타낸다. Fig. 3은 가압 시작 직후의 초기 구간에서 측정된 압력 증분 (pressure increment)과 헬륨 주입 질량 유량의 시간에 따른 변화를 1초 간격으로 보여주고 있다. 가압 시작 직후에는 정상 상태의 구간의 압력 증분 (약 0.1 kPa)보다 매우 큰 압력 증분 (약 0.4 kPa)이 측정되었다. 하지만, 헬륨 주입 질량 유량의 경우는 초기 수 초 동안 오히려 작은 질량 유량으로 유입되면서 점차 증가하여 정상상태의 질량 유량에 도달한다. 초기 헬륨의 주입 질량이 작음에도 불구하고 가압 증분은 오히려 크게 이루어지는 물리적 이론과 반하는 현상이 열식 유량계와 압력계를 통해서 관찰된다. 이로 인해 초기 구간에서 매우 큰 PVT 측정오차가 발생한다. 이 현상의 원인은 실험적 오차로써 열식 유량계의 반응시간 (200 msec. 이하)이 상대적으로 압력 센서의 반응 시간 (300 Hz, 약 3.3 msec.)에 비해 매우 길기 때문이다.

이는 열교환 계수 측정을 통해 유체의 질량 유량을 측정하는 열식 유량계의 기본적인 특성이다. 이러한 느린 반응 속도 때문에 열식 유량계의 초기 구간에서 낮은 유량 신호가 과도적으로 나타난다. 반면, 극저온 상태의 저장 탱크 내부로 상온(300 K)의 기체 헬륨이 순간적으로 주입되므로 그 시점에서는 탱크 내벽과의 열교환이 원활하지 못하여 순간적으로 높은 가압 상황이 필연적으로 발생한다. PVT 측정 오차는 헬륨 가압을 시작할 때의 초기 시점과 측정 시점 사이의 온도와 압력의 차이, 그리고 주입된 헬륨 기체의 질량을 토대로 계산되므로 위와 같은 초기 수 초 구간에서 발생하는 큰 오차는 Fig. 2에서 보여지는 바와 같이 측정하는 시간 동안 계속 측정 오차에 영향을 미친다. 하지만 초기 구간이 지난 후는 Fig. 3의 5초 이후의 구간과 같이 정상 상태의 안정된 헬륨 주입 질량 측정 및 가압이 수행되므로 측정 오차는 시간이 흐를수록 줄어든다. 초기 압력 증분의 영향을 빠르게 감쇄시키기 위해서는 고유량의 헬륨을 주입하여 탱크 내부 압력 증

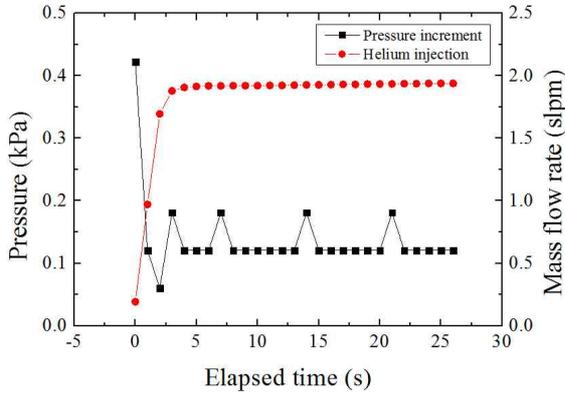


Fig. 3. Curves of pressure increment and helium mass flow rate near initial state.

가을을 높여야 한다. 따라서 Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 헬륨의 주입 유량이 커질수록 오차가 감소하는 속도가 빨라진다. 2 slpm 주입의 경우 가압 종료 시점에서의 오차는 2.53%, 6 slpm 주입의 경우는 -1.64%, 10 slpm 주입의 경우는 -1.24%의 오차를 보인다. 고유량의 헬륨을 주입한 경우일수록 충분한 가압 후 가압 종료 시점에서 높은 정확성의 계측이 수행됨을 실험적으로 확인하였다. 하지만 고유량으로 가압 기체를 주입하는 경우 실제 상황에서 로켓의 추진체 저장 탱크의 안정성에 영향을 끼치며, 고유량뿐만 아니라 저유량의 헬륨 주입 조건에 대해서도 수 백초의 긴 가압 시간을 필요로 하기 때문에 잔량 측정법의 오차를 줄이는 방법론으로는 적절하지 않다.

4. 순간 해석 기법을 적용한 PVT 측정법

본 연구에서는 열식 유량계의 과도적 측정 특성과 더불어 상온 기체 헬륨의 주입을 통한 초기 오차 발생의 문제점을 해결하기 위하여 기존의 PVT 해석법이 아닌 순간 해석 기법을 제시하고자 한다. 순간 해석 기법은 시간에 따른 측정 오차 계산을 수행하는 동안 기존의 실험 초기 조건을 계속 사용하지 않고, Fig. 4와 같이 계산이 진행되는 미소 시간 구간마다 새로운 초기 상태($i-1$)와 후기 상태(i)의 측정된 압력, 온도, 그리고 헬륨 주입 유량을 계산에 적용하여 미소 시간이 진행되는 순간마다 초기 조건이 갱신되는 기법이다. 따라서 실험 시작 단계의 큰 측정 오차가 시간이 지난 후의 측정 오차에 영향을 미치지 않게 된다. 순간 해석 기법에서의 기체부 부피는 미소 시간 구간 간격으로 계산되어야 하므로 식 (2) 대신 식 (5)와 같이 구해진다.

Fig. 5는 2 slpm의 헬륨 주입 유량의 실험 결과에 순간 해석 기법을 적용하여 계산한 PVT 측정 오차를 시간에 따라 나타내고 있다. 미소 시간 구간은 1초로 설정되었다. Fig. 2의 PVT 측정 오차 곡선과는 다르게, 초기에 발생한 오차와 상관없이 미소 시간 구간이 지나가면 오차가 영 (0)의 값을 중심으로 계산되는 결과를 보이고 있다. 미소 시간 동안 주입된 질량 유량, 저장 탱크 내부의 압력, 그리고 온도는 변화량이 매우 작기 때문에, 센서의 측정 오차에 따라서 간헐적으로 매우 큰 오차 값들이 중간 중간 발생함을 볼 수 있다. 이러한 측정 오차 결과를 처리하기 위하여 Fig. 6과 같이 -50~50% 구간에서 1% 간격의 계급의 연속적인

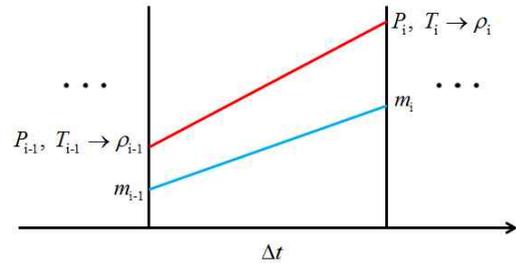


Fig. 4. Calculation during a one small time step for instantaneous PVT mass gauging method.

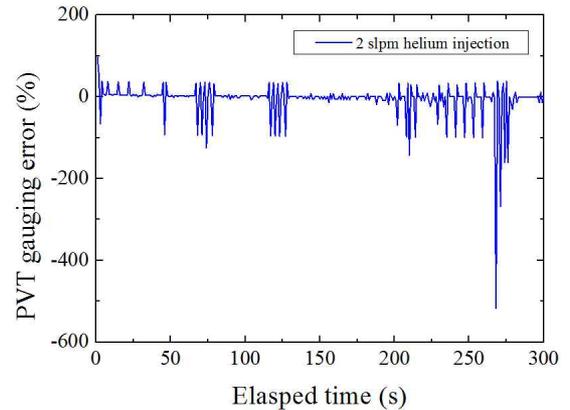


Fig. 5. PVT gauging error by instantaneous analysis.

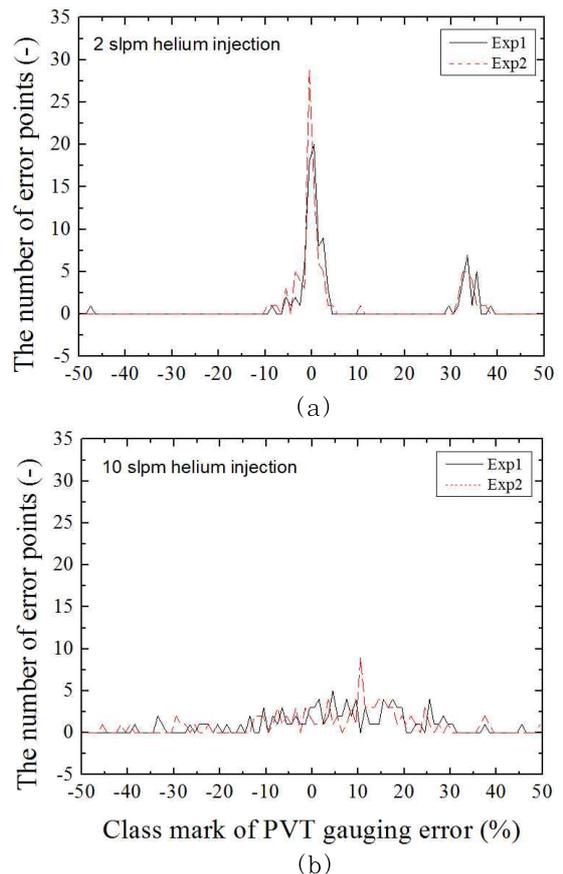


Fig. 6. Continuous type histograms of the number of error points with 1% interval width: (a) 2 slpm and (b) 10 slpm helium injection case.

히스토그램 형태로써 측정 오차의 도수 분포를 표현하였다. Fig. 6의 (a), (b)는 각각 2, 10 slpm의 헬륨 주입 실험의 두 번씩 반복된 실험 결과의 히스토그램이며, 가압 후 100초까지의 측정 결과만을 나타내고 있다. 두 히스토그램을 비교해보면, 2 slpm의 저유량 주입의 경우 매우 뚜렷하게 오차 계급값 0% 근처에서 도수가 몰려있어 산포도가 작지만, 10 slpm의 고유량 주입의 경우는 산포도가 큰 것을 알 수 있다. 또한 단순히 최대 도수를 가진 계급을 보더라도 2 slpm의 경우는 0-1%, -1-0%의 구간이지만 10 slpm의 경우 4-5%와 10-11% 구간에서 최대 도수를 가진다. 실험에서 수행된 2, 6, 10 slpm의 헬륨 주입 유량에 따른 순간 해석 기법을 통한 측정 결과를 간단히 처리하기 위해서 최대 도수를 가진 계급의 변량들의 평균값으로 PVT 측정 오차를 구해보면, 2 slpm는 -0.11%, 6 slpm의 경우는 11.0%, 그리고 10 slpm는 8.43%이다. 이와 같이 기존의 PVT 측정과 다르게 가압 시간과 상관없이 100초까지의 측정 결과만으로도 저유량의 2 slpm 주입 조건에서 매우 정확한 수준의 부피 측정이 수행됨을 알 수 있다.

헬륨 가압 시 고유량으로 주입하는 경우 상대적으로 큰 오차가 발생하는 원인은 시간에 따른 탱크 내부의 수직 온도 분포 변화를 보여주는 Fig. 7에서 볼 수 있다. Fig. 7(a)의 2 slpm과 같은 저유량 주입의 경우, 전체적인 온도 증가 폭이 고유량 주입의 경우인 Fig. 7(b)와 비교해서 훨씬 작다. 또한 최상부 및 최하부에서는 열교환이 원활하여 온도 상승 폭이 낮으며 열교

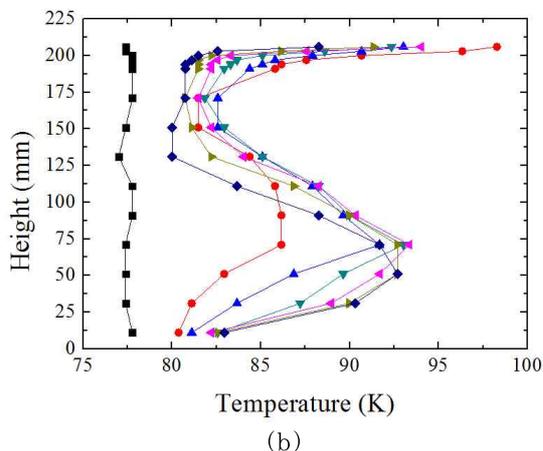
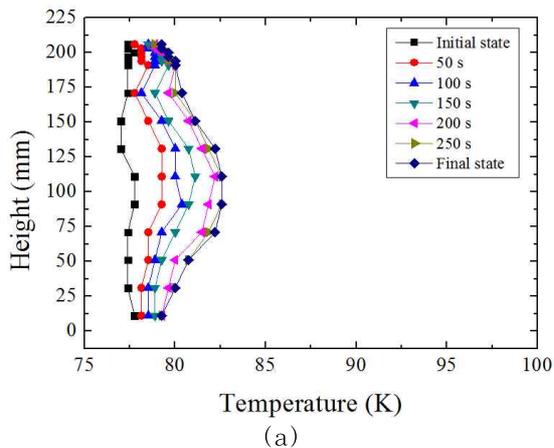


Fig. 7. Transient vertical temperature profile by the helium injection with different mass flow rate: (a) 2 slpm (b) 10 slpm helium injection.

$$V_{u,i} = \frac{m_i - m_{i-1}}{\rho_i - \rho_{i-1}} = \frac{m_i - m_{i-1}}{f(P_i, T_i) - f(P_{i-1}, T_{i-1})} \quad (5)$$

환이 원활하지 않은 탱크 중앙 부분의 온도만 높아져 종 모양의 온도 증가 폭을 보이므로 내부 온도 추정이 비교적 쉽다. 하지만, Fig. 7(b)의 10 slpm과 같은 고유량 주입의 경우, 높은 유속의 헬륨 기체의 주입으로 인하여 내부 온도의 증가 양상이 매우 불규칙하게 발생하며, 특히 탱크 내부의 빠른 유동으로 인한 최상부 층의 온도의 급격한 상승이 관찰된다. 이러한 유량에 따른 온도 변동성 증가 때문에 고유량을 주입하는 6, 10 slpm 헬륨 주입 실험의 측정 오차가 2 slpm 헬륨 주입 실험의 값보다 크게 나타난다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 잔량 측정법의 연구에서 언급되지 않았던 PVT 실험의 측정 오차의 원인을 좀 더 세밀하게 파악하고자 증발 기체가 없는 경우에 대하여 극저온 균일 온도 상태인 저장 탱크에서 PVT 실험을 수행하였다. 극저온 펌프 설비 추가 및 실제 작동 조건에서 적용하기 어려운 정성적인 해석 기법에 관련된 문제점을 해결할 수 있는, 새로운 순간 해석 기법의 PVT 잔량 측정법을 제안하였다. 순간 해석 기법을 적용한 PVT 잔량 측정법을 통하여 2 slpm의 저유량 헬륨 가압 조건에서는 -0.11%의 높은 정확성을 얻었으며, 고유량 헬륨 가압 조건에서는 높은 오차가 나오는 원인을 저장 탱크 내부의 수직 온도 분포 측정 실험을 통해 파악하였다.

향후 다양한 충전량의 극저온 유체가 저장되어 있는 조건에서 순간 해석 기법의 PVT 잔량 측정법 연구가 수행되어야 하며, 결과 처리 기법 또한 통계학적인 고찰을 통하여 제시되는 것이 바람직하다고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] F. T. Dodge, "Propellant mass gauging: Database of vehicle applications and research and development studies," NASA/CR-2008-215281, 2008.
- [2] C. H. Panzarella and M. Kassemi, "Self-pressurization of large spherical cryogenic tanks in space," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 42, pp. 299-308, 2005.
- [3] M. V. Chobotov and G. P. Purohit, "Low-Gravity Propellant Gauging System for Accurate Predictions of Spacecraft End-of-Life," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 30, pp. 92-101, 1993.
- [4] N. T. Van Dresar, "PVT gauging with liquid nitrogen," *Cryogenics*, vol. 46, pp. 118-125, Feb-Mar 2006.
- [5] M. Seo, et al., "Improved estimation of cryogenic liquid volume under low gravity condition," presented at the Space cryogenic workshop, Coeur D'Alene, Idaho, 2011.
- [6] N. T. Van Dresar, "An uncertainty analysis of the PVT gauging method applied to sub-critical

cryogenic propellant tanks," Cryogenics, vol. 44, pp. 515-523, 2004.

저 자 소 개



서만수(徐万洙)

1985년 9월 10일생, 2007년 KAIST 기계공학과 졸업, 현재 동대학원 기계공학과 통합과정.



정상권(丁常權)

1962년 8월 16일생, 1985년 서울대 기계공학과 졸업, 1992년 MIT 기계공학과 졸업(공학박사), 1992 ~ 1995년 MIT-Plasma Fusion Center 연구원, 현재 KAIST 기계공학과 교수.



정영석(鄭永錫)

1975년 2월 13일생, 2007년 서강대학교 화학공학과 졸업, 동대학원 화학공학과 졸업(공학석사), 현재 항공우주연구원 선임연구원.



구동훈(丘東勳)

1992년 6월 16일생, 현재 KAIST 기계공학과 학부과정.



지동진(池東珍)

1993년 5월 24일생, 현재 KAIST 부속 영재과학고등학교 재학.