

## 技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(12), 1108-1115(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.12.1108

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 오리피스에서 기체의 표준유량을 이용한 산소와 헬륨의 누설량 측정에 관한 연구

이중엽\*, 한상엽\*, 허환일\*\*

### Study on Leakage Measurements of Oxygen and Helium Using Standard Gas Flow Rates in a Orifice Flow

Joongyoup Lee\*, Sangyeop Han\* and Hwanil Huh\*\*

Korea Aerospace Research Institute\*, Chungnam National University\*\*

#### ABSTRACT

In this study, correlation equations were arranged about mass flow rates of oxygen and volume flow rates of helium using a mouthpiece method. The mouthpiece method can reduce examination cost by using similar empirical formula. Instead of liquid oxygen, in the mouthpiece method, gas helium can be measured in order to determine the leakage amount of liquid oxygen conveniently. Experiment was conducted and compared to understand leakage amount relation between the helium and the oxygen for prototype item under a room and a cryogenic temperature conditions. The leakage volume flow rate [A.mℓ/s] of the helium was 174 times higher than mass flow rate [g/s] of the oxygen leakage at liquid state. The derived correlation equations were verified using data from the National Institute of Standards and Technology (NIST).

#### 초 록

본 연구에서는 마우스피스 방법을 이용하여 산소의 질량유량 측정과 헬륨의 체적유량 측정에 대한 관계식을 정리하였다. 마우스피스 방법은 상사된 실험식을 이용함으로써 시험비용을 절감할 수 있다. 마우스피스 방법에서는 기체헬륨을 측정하여 용이하게 액체산소의 누설량을 측정할 수 있다. 시제품의 누설량 측정에서 상온과 극저온 상태의 헬륨과 산소간의 누설량 관계를 이해하기 위해 실험을 수행하여 비교하였다. 헬륨의 누설 체적유량[A.mℓ/s]은 액체상태의 산소 누설의 질량유량[g/s]에 대비하여 174배였다. 실험식과 비교된 계산식은 미국 국립기술표준원의 자료를 이용하여 증명하였다.

**Key Words** : Mouthpiece Method(마우스피스 법), Leakage(누설), Liquid Oxygen(액체산소), Gas Helium(기체 헬륨), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진)

† Received : June 23, 2015

Revised : November 14, 2015

Accepted : November 16, 2015

\*\* Corresponding author, E-mail : hwanil@cnu.ac.kr

## 1. 서 론

기밀을 요하는 시제품의 경우 제품제작 후 누설량 시험을 통해 제작 품질을 판정한다[1]. 일반적인 누설시험방법에는 비눗방울(Soap Suds) 방법과 수조 방법(Aquarium), 마우스피스(Mouthpiece) 방법, 진공(Evacuation) 방법 등이 있다. 각 시험의 개략적인 방법은 다음과 같이 나눌 수 있다.

비눗방울 방법은 누설확인을 위한 부위에 비눗물을 뿌리고 시제 내부에 기체를 충전하여 비눗방울이 형성되는지 확인한다. 누설량이 극히 미량인 경우에 흔히 사용하는 방법이다.

수조 방법은 기체로 가압된 시제를 액체 수조에 담그고 시험압력을 유지하여 수 분 동안 관찰하는 것이다. 기체 방울이 형성되었다면 외부 또는 내부누설이 발생하는 것으로 판단한다. 용기와 같이 내부공간이 존재하는 중대형 구조체에 주로 사용하는 방법이다. 누설이 발생하더라도 외부 형상이 복잡한 경우 기포가 표면장력에 의해 분리되지 않고 외피에 붙어있을 수 있는데, 이것은 시험결과 오류를 야기시킬 수 있다.

진공 방법은 밀폐 공간에 시제품을 위치시키고 유출되는 기체량을 추가로 연결된 측정기의 수치로 확인한다. 이때 사용되는 기체는 대부분 헬륨을 이용하며 미세 누설량까지 측정할 수 있으나, 장치가 고가인 관계로 초기 구성 시 예산이 많이 소요되는 단점이 있다.

마우스피스 방법은 밸브류 등에 흔히 사용하는 방법으로서 시제품을 액체에 직접 담그지 않고 출구쪽 튜브를 액체에 담가 기체 방울이 발생하는지를 관찰한다. 시험용 매질(Media Fluid)이 기체인 관계로 시제품에는 유착되지 않기 때문에 시제품의 청결도를 요하는 경우에 주로 사용하게 된다. 마우스피스 방법은 수조 방법보다 정밀하게 정량적인 결과를 확보할 수 있다.

거대용기가 아닌 외형이 작은 시제품의 경우 공장시험 단계에서 발생하는 시험비용을 최소화하기 위해 대부분 마우스피스 방법을 이용하여 시험하게 된다. 예를 들어 Fig. 1에서와 같이 대기압 상태의 액체질소에 시제품 밸브가 잠기도록 한다. 이때 안전을 고려하여 불활성 기체인 액체질소를 사용하고, 내부기밀 확인용 기체는 액체질소의 끓는점에 도달하더라도 액화가 진행되지 않는 헬륨을 이용하여 출구 측의 누설상태를 점검한다. 만약 끓는점이 높아 액화가 쉽게 진행되는 기체를 사용할 경우 액체 상태로 제품내부에 그대로 정체되어 누설량 결과를 신뢰할 수 없게



Fig. 1. Test item under liquid nitrogen[2]

되는데 시제품 시험에서는 주변의 온도에 영향을 받지 않는 기체를 택하여 적용해야 한다.

마우스피스 방법은 해당 시제품을 극저온유체에 담근 후 극저온 온도로 완전히 냉각되도록 한 다음 내부 입구로 헬륨을 가압하고 반대편 포트로 일부 누설이 발생되도록 하는데 이때 그 양을 정밀하게 측정하게 된다. 여기서 시제품은 일반적으로 밸브를 가리킨다. 시제품류의 누설량 시험에서 사용하게 되는 기체의 경우 요구사항에서 제시하는 액체가 아닌 극저온 상태의 기체이므로 요구조건에 상이할 수 있다.

액체를 이용한 시험의 경우, 고압런탱크에서 극저온 및 고압 유체를 발생시키고 동시에, 유동 발생 유무에 따라 시제품 누설량 검사를 수행하게 된다. 누설량 검사를 위해서는 고압/극저온 시험설비의 구축은 물론, 그에 따른 안정장치가 추가 설치되어야 한다. 이러한 시험장치의 제약과 시험비용의 과다 발생의 문제로 인해 가급적 시험비용을 최소화하는 것이 최대목표이고 이를 위해 기체와 액체간의 누설량에 대한 비교 자료가 필요하게 되었다. 대상 시제품에서 사용하는 작동유체 및 매질은 여러 종류가 가능하나, 본 논문에서 한정하는 대상은 기체헬륨과 액체산소이다.

본 논문에서는 시제품의 누설량 측정에서 액체의 질량유량과 기체의 체적유량에 대한 연관 관계를 확인하고자 한다. 이를 바탕으로 공장시험 단계에서 저비용의 장치를 이용한 체적유량 측정법으로도 질량유량 측정법에 의한 누설량 조건을 충분히 만족하도록 이론식과 실험식을 제시하고

자 했다. 유도된 연관식을 미국 국립표준기술연구소(NIST, National Institute of Standard and Technology)의 자료를 이용하여 증명한다.

## II. 본 론

### 2.1 이론적 배경

기체가 열교환기를 통해 변환된 표준유량(SCMH, Standard Cubic Meter per Hour) 식은 실험에서 확보된 압력과 온도, 실제유량(ACMH, Actual Cubic Meter per Hour) 의해 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[3].

헬륨과 산소를 이용한 누설량 실험에서 시제품을 통해 발생한 체적유량은 식 (1)을 이용하여 표준유량으로 환산할 수 있고 이것을 다시 질량유량 식인 식 (2)와 식 (3)으로 나타낼 수 있다. 여기서 실제유량을 표준유량으로 환산하기 때문에 사용기체의 표준압력과 표준온도를 알고 있어야 한다. 이것은 실험을 통해 확보해야 하는 인자이다. 식 (1)에서 유량계를 통과하는 유동이 내부 유속이 클수록 표준유량의 크기도 증가됨을 알 수 있다. 그러나 가스유동이 극저온이 아닌 상온인 경우 표준유량에 미치는 영향은 미미하다[4].

$$SCMH = \frac{ACMH}{\left[ \frac{P_{std}}{P_{act} - P_{sat} \phi} \right] \frac{T_{act}}{T_{std}}} \quad (1)$$

식 (1)에서  $P_{std}$ 는 표준절대공기압이고,  $P_{act}$ 는 유량계의 차압,  $P_{sat}$ 는 실제온도에서 포화압력,  $\phi$ 는 습도비,  $T_{act}$ 는 유량계 전단에서의 온도,  $T_{std}$ 는 표준온도이다. 여기서, 표준상태는 온도의 경우 288 K 고, 압력은 1 atm 이다.

연속방정식과 이상기체상태방정식을 정리하면 식 (2)와 같다. 식 (1)에서 결정된 표준유량은 식 (2)를 이용하고 사용된 기체의 비기체상수를 이용하여 식 (3)과 같이 표준화된 상태의 질량유량 식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{m} [g/s] = \rho_{std} \times Q [S.m^3/s] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{P_{std} \times SCMH}{R \times T_{std} \times 3600018} \\ &= \frac{97.7 \times SCMH}{R} \quad (3) \end{aligned}$$

여기서,  $R$  = Specific gas constant [J/kg/K]

식 (2)는 기체의 표준유량을 질량유량으로 변환하는 식이다. 식 (2)는 표준유량을 이용하므로 실제기체의 압력과 온도는 표준화가 필요하고, 이 때 표준유량과 비기체상수를 통해 식 (3)과 같이 질량유량으로 계산할 수 있다.

유체 시스템에서 오리피스 전단의 면적이 오리피스 면적 보다 크고, 오리피스를 통과할 때 캐비테이션(Cavitation) 발생하지 않으며, 점성효과를 무시한다면 식 (4)와 같이 유량식으로 나타낼 수 있다. 또한 기체 상태에서 오리피스를 통과하는 유량식은 식 (5)와 같다. 본 논문에서는 액체 상태일 때의 산소와 기체상태의 헬륨과의 상사성 관계를 구하고자 함으로, 식 (4)는 액체산소를 계산하고 식 (5)에서는 기체 산소와 헬륨의 유량을 계산할 수 있다[5, 6].

$$Q = C_q A \sqrt{\frac{2g|\Delta P|}{\rho}} \quad (4)$$

여기서,  $C_q$ 는 유량 계수이고,  $A$ 는 오리피스 면적,  $g$ 는 중력가속도이다.

$$\dot{m} = A C_q C_m \frac{P_u}{\sqrt{T_u}} \quad (5)$$

여기서,  $C_m$ 은 유량 변수이며,  $P_u$ 는 전단압력,  $T_u$ 는 기체의 전단온도이다.

식 (4)와 식 (5)는 액체와 기체의 상이 명확하다. 그러나 본 논문에서는 극저온 헬륨과 산소 간의 상사를 증명하기에 한계가 있다. 따라서 상이 불명확한 점을 개선하기 위해 식 (1)의 표준유량식을 사용했다.

식 (1)과 식 (2), 식 (3)을 실험적 관점에서 정리하면 다음과 같다. 기체 헬륨인 경우 냉각을 목적으로 사용하는 액체질소를 이용하여 끓는점까지 냉각하더라도 액체로 상이 바뀌지 않는다. 이를 모사하기 위해 헬륨을 액체질소용기 내의 열교환기로 통과시키면 극저온의 기체헬륨이 된다. 기체산소는 동일한 열교환기를 통해 액화된 액체산소를 얻을 수 있으며 생산된 극저온 헬륨과 온도는 같을지라도 상은 각각 다르다. 따라서 액체와 기체 상태에서 제시된 오리피스 식을 사용할 수 없게 된다. 그러므로 액체 상태로 발생된 산소인 경우 드레인 관을 통해 액체에서 기체로 상변화가 이루어진 기체를 표준유량으로 변환한다. 변환 목적은 상사 대상인 극저온 헬륨으로 열교환된 온도와 서로 다르기 때문이다. 이러한 이유로 식 (1)의 표준유량을 사용하며 열교환 당시의 발생기체 온도를 표준화 시키게 된다.

유량계수는 실험적이면서 이론적 관계를 이루고 있다. 이 계수는 국지적 마찰과 운동에너지 손실에 의한 여분 손실을 포함한다. 유속이 아음속일 경우 유량 변수는  $\frac{P_{vc}}{P_u}$  와 같이 압력비로 나타낼 수 있고, 유속이 음속일 경우 유량변수  $C_m$  은 일정하게 된다[6]. (여기서,  $P_{vc}$  는 베나 쿼트렉터에서 압력)

유속은 항상 압력비와 임계압력비에 의존적이며, 임계압력비( $P_{cr}$ )는 식 (6)과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{cr} = \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (6)$$

여기서,  $\gamma$ 는 비열비

유량변수 ( $C_m$ )는 다음과 같이 아음속과 음속 두 경우에 대해 식 (7), 식 (8)과 같이 차등 적용할 수 있다[7, 8].

만약  $\left( \frac{P_{vc}}{P_u} \right) > P_{cr}$  (subsonic) 인 경우 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_m = \sqrt{\frac{2\gamma}{R(\gamma-1)}} \times \sqrt{\left( \frac{P_{vc}}{P_u} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P_{vc}}{P_u} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}} \quad (7)$$

$\left( \frac{P_{vc}}{P_u} \right) \leq P_{cr}$  (sonic) 경우는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_m = \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (8)$$

### 2.2 실험방법

Figure 2와 Fig. 3과 같이 용기에 담겨져 있는 열교환기 주변으로 액체질소를 채우게 된다. 상온의 기체가 저온으로 열교환 되면서 액체질소를 소진하므로 지속적인 액체질소가 유입될 수 있도록 Fig. 3처럼 유입장치를 구성했다. 시제품을 대신하는 열교환기와 열교환기 내부로 인입될 수 있는 튜브, 열교환기를 냉각시킬 수 있도록 액체질소를 담을 수 있는 단열용기로 이루어져 있다. 출구 측 튜브는 누설량 측정기인 질량유량계로 연결되어 있다. 이러한 구성으로부터 헬륨 실린

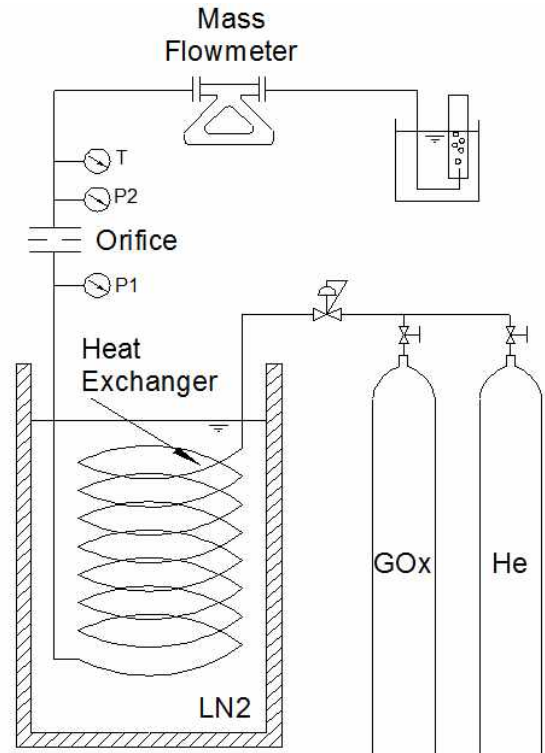


Fig. 2. Schematic of experiment

더로부터 상기 테스트용 시제품의 내부로 헬륨을 공급하면극저온의 액체 질소와 열교환이 이루어지면서 극저온의 헬륨으로 바뀌게 되고 결국 테스트용 극저온 밸브를 통과하는 매질은 모두 극저온 조건으로 바뀌게 된다.

Figure 2는 산소와 헬륨의 누설량 측정을 위한 장치를 볼 수 있고 실험을 위한 조건은 모두 동일하며 실험을 위한 기체만 다르다. 상사 관계를 검증하기 위하여 대상 기체인 고압의 산소와 헬륨이 필요하다. Fig. 2와 같이 가압하기 위한 소스와 일정한 압력으로 조절할 수 있는 감압장치가 존재한다. 측정결과를 신뢰할 수 있도록 두가지의 혼합기체를 이용하는 것이 아니라, 한가지의 순수 기체만을 이용하며 실험용 튜브에 잔여 물질이 존재하지 않도록 했다[9]. 감압된 기체는 열교환기를 통과하자마자 온도가 급감하고 오리피스를 지난 산소와 헬륨은 드레인 튜브를 통해 일정 온도로 상승하도록 하여 표준유량을 계산하도록 한다. 온도는 오리피스 후단인 질량유량계 전단에서 측정하도록 했다.

Figure 2의 열교환기는 Fig. 1의 시제품을 모사한 것이다. 상기 언급한 바와 같이 공장시험에서 액체질소에 잠겨 있는 시제품인 경우 충분히 냉각이 이루어진 것을 확인한 다음 헬륨을 가압하게 된다. 열교환기가 코일 형태를 띠는 이유는



기체의 산소와 헬륨이 가압되어 유동이 형성 시 일정한 가압압력을 유지하기 위해 상온의 두 기체를 지속적으로 입력하기 위함이다. 열교환기는 접촉면적을 극대화하여 제작된 관계로 가압과 동시에 신속히 액화가 이루어질 수 있다.

고압과 대유량 제어가 가능한 시험설비를 이용하여 실험을 수행할 경우 다량의 액체산소를 충전해야 하며 이와 동시에, 해당하는 고압으로 가압해야하므로 누설확인 시험 시 낭비되는 유체가 발생할 수 있다. 이를 극복하기 위해 Fig. 3과 같은 형태로 열교환기를 고안하여 장치를 제작하였다. 기체산소인 경우 열교환기를 통과하면 주변이 액체질소이므로 통과된 산소는 출구에서 과냉각된 액체산소로 변경될 것이다. 헬륨은 열교환기를 통과하더라도 상변화가 없는 극저온의 기체헬륨이다(Fig. 3).

Figure 4의 질량유량계(Micro Motion Coriolis Flowmeter, CMF010)는 드레인 튜브를 통과한 헬륨과 산소의 질량유량을 측정할 수 있다. 질량유량계의 정확도는 액체인 경우  $\pm 0.1\%$ 이고 기체는  $\pm 0.35\%$ 이다. 측정은 시제품에서 발생 유량을

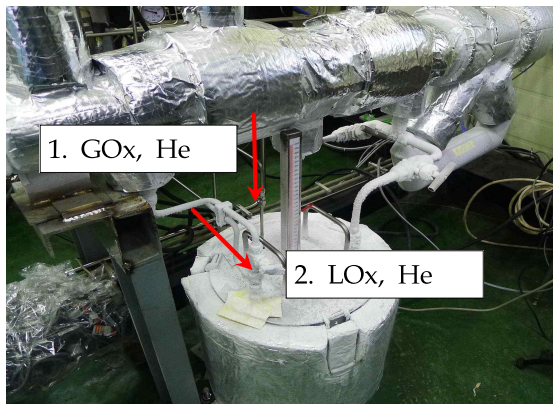


Fig. 3. Heat exchanger

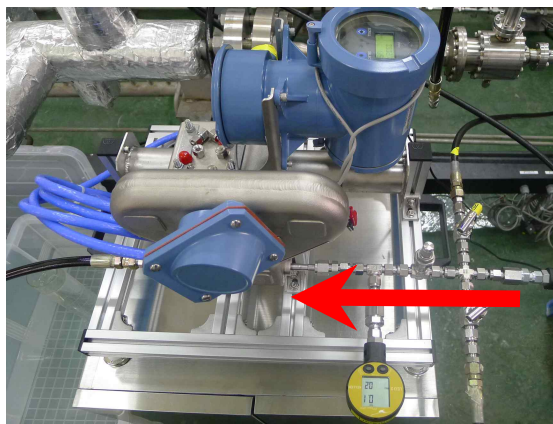


Fig. 4. Coriolis mass flow meter

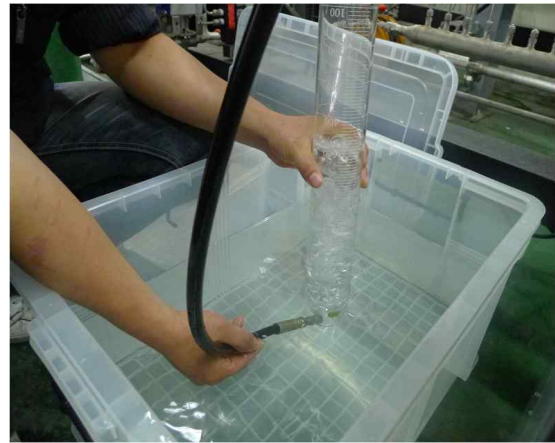


Fig. 5. Mouthpiece method

측정하기 위해 차압이 존재해야 하며 이 때 시제품과 같이 일정 차압을 모사하도록 오리피스를 사용했다[10].

체적유량은 상온상태의 산소 및 헬륨을 매스실린더를 이용하여 측정하고 동시에 배출된 기체를 질량유량계로 통과되도록 하여 상온상태의 체적과 질량유량을 비교했다. 공장시험단계에서 사용하는 마우스피스 방법과 유사하도록 매스실린더와 스톱워치를 이용하며 수행하는 과정은 Fig. 5와 같다. 그 외의 압력측정용 센서의 경우 현장에서 육안 확인이 가능하도록 디지털압력게이지를 이용하였고 압력센서의 정확도는  $\pm 0.1\%$ 이다 [11].

2.3 실험 결과와 고찰

Figure 1의 시제품의 누설량은 기밀부위의 문제로 발생하는 것이다. 따라서 누설량이 많고 적음은 오리피스의 직경을 통해 모사할 수 있다. 오리피스 직경과 기체의 종류에 따라 표준유량을 측정할 수 있다면 Fig. 1과 같은 시제품에 대한 누설량을 저비용으로 간단히 측정할 수 있다.

Figure 3과 Fig. 4의 장치를 준비하고 여러 가지 오리피스에 대해 유량실험을 수행했다. 오리피스의 전단압력은 유동질식(Choking) 조건이 이루어지도록 약 1 MPa로 유지하고 유량계까지는 차압이 없도록 하여 대기압에 근사하도록 했다. 상온의 헬륨과 산소는 전단압력을 유지하며 각 오리피스를 교체하여 유량실험을 수행했다. 유동 발생 후 정상상태로 도달하도록 하여 물리적 특성 값을 정리했다. 상온상태의 헬륨과 산소는 압력과 유량에서 정상상태를 유지하므로 계측기록 장치가 아닌 Fig. 4와 같이 트랜스미터 창에서 출력된 수치를 현장에서 기록토록 했다.

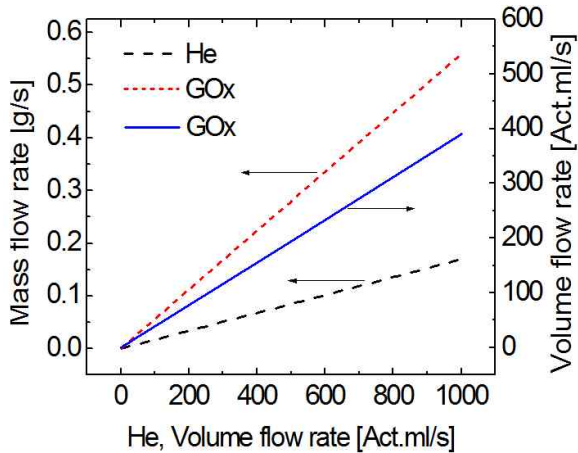


Fig. 6. Comparison between volume flow rate and mass flow rate

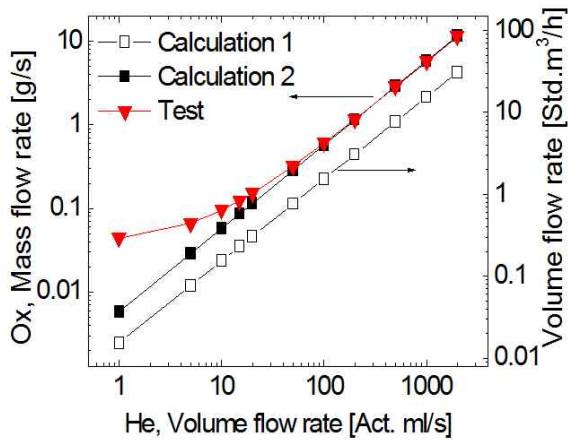


Fig. 7. Comparison between experiments and calculational results

Figure 6은 상온의 헬륨과 산소의 관계식을 찾기 위해 질량유량계(Fig. 4)측정과 마우스피스방법(Fig. 5)을 이용하여 동시에 측정한 결과를 볼 수 있다. Fig. 6의 결과에 의하면 산소와 헬륨의 체적과 질량유량은 일정비율의 관계를 포함하고 있다.

Figure 7은 Fig. 2에서 오리피스 후단의 온도가 약 173 K를 지시할 때 산소와 헬륨의 실험결과를 정리한 것이다. Fig. 7의 x축은 온도 173 K에서 헬륨이며, 좌축의 y축은 동일온도 조건하의 산소에 대한 질량유량이다. 우축의 y축은 비기체 상수가 결정되기 전의 표준유량이다. 식 (3)과 표준유량을 통하여 헬륨과 산소의 질량유량을 구할 수 있다. 실험을 통해 확보된 관계식은 단순히 식 (9)와 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

상온 헬륨의 체적유량,  $x[\text{ml/s}]$ 와 상온 산소의 질량유량,  $y[\text{g/s}]$ 은 식 (9)처럼 관계를 갖는다. 이

것은 Fig. 7의 Calculation 2에 해당한다.

$$y = 0.000489116 x + 0.01032 \quad (9)$$

식 (3)과 식 (5)를 이용하여 헬륨의 체적유량에 대한 오리피스 직경을 구한 다음에 결정된 직경을 이용하여 상온의 산소에 대한 질량유량을 계산하면 실험식 (9)와 일치된다.

상온 헬륨의 체적유량,  $x[\text{ml/s}]$ 와 상온 산소의 체적유량,  $y[\text{ml/s}]$ 의 실험식은 식 (10)과 같으며, Fig. 7의 Calculation 1이다.

$$y = 3.9 x \quad (10)$$

Figure 7의 계산과 실험의 비교에서 헬륨이 100 ml/s 이하 부근에서 오차를 보임을 알 수 있다. 이것은 실험당시 헬륨의 온도가 173 K이며, 질량유량계가 해당 온도조건 하에서 측정할 수 있는 유량범위를 초과한 것으로 판단되며 이것으로 인해 부정확한 선도를 이끌어내는 것으로 사료 된다. 2.4절에 따라 Fig. 7의 Test의 지수선도 보다는 Calculation 2의 선형적으로 증감하는 선도가 더 신뢰할 수 있음을 알 수 있다.

## 2.4 비교 및 검증

Table 1 ~ Table 3에서는 NIST[12]에서 제공하는 웹사이트를 참고하여 정리한 산소와 헬륨에 대한 물성표이다. Table 1과 Table 3에서는 대기압과 0.16 MPa의 온도에 대한 산소의 물성을 정리했다. 헬륨에 대해 대기압 조건하에서 온도별 밀도 분포를 Table 2에서 보여주고 있다.

Table 1. Oxygen properties under atmospheric pressure[12]

온도 [K]	밀도 [ $\text{kg/m}^3$ ]	상태
90.19	1141.2	liquid
90.19	4.467	vapor
173.15	2.263	vapor
288.15	1.354	vapor

Table 2. Helium properties under atmospheric pressure[12]

온도 [K]	밀도 [ $\text{kg/m}^3$ ]	상태
88.15	0.552	vapor
173.15	0.281	vapor
288.15	0.169	vapor

**Table 3. Oxygen properties under 0.16 Mpa[12]**

온도 [K]	밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]	상태
88.15	1151.4	liquid
94.8	1118	liquid
94.8	6.799	vapor
173.15	3.583	vapor
288.15	2.140	vapor

**Table 4. Correlation of flow rates**

구분	A	B	C
	산소 @95 K, 0.16 MPa	산소 @288 K, 0.1 MPa	헬륨 @288 K, 0.1 MPa
밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]	1118	1.354	0.169
질량 유량 [g/s]	0.058	0.058	0.0072
체적 유량 [S.m <sup>3</sup> /h]	0.000185	0.15312	0.15333

**Table 5. Correlation with liquid oxygen and helium**

액체 산소 유량 [g/s]	헬륨 유량 [ml/s]
0.006	1
0.058	10
0.115	20
0.576	100

연속방정식에 의한 유량관계는 식 (11)과 같다.

$$\dot{m} = \rho Q \tag{11}$$

Table 4의 질량유량은 식 (3)에서 표준유량과 기체의 비기체상수를 이용하여 나타낼 수 있다. Fig. 7의 실험결과와 해석결과의 검증을 위해 Fig. 7의 헬륨 10 ml/s 선정했고 검증 결과는 Table 4에 나타냈다.

10 ml/s의 누설이 발생 했을 당시의 헬륨이 173 K과 유량계의 차압이 0.16 MPa 이다. 이때의 누설 유량은 식 (3)를 이용하여 정리하면 Fig. 7과 같이 산소의 질량유량은 약 0.058 g/s (Fig.

7의 y축 좌측)으로 환산할 수 있고, 이때의 표준 유량은 약 0.15 S.m<sup>3</sup>/h (Fig. 7의 y축 우측)이다.

예를 들면 다음과 같다. Table 4에서는 마우스 피스 방법(Fig. 5)으로 실험한 결과를 표준유량으로 환산 시 체적유량 측면에서 동일함을 증명하였다. Table 4를 보면 열교환기를 통해 냉각된 기체산소가 액체산소로 상이 바뀌며 당시의 밀도는 약 1,118 kg/m<sup>3</sup>(Table 4)이며, 오리피스를 통과한 유량도 액체상태 이다. 액화된 산소가 진유도관을 통해 완전히 기화되고 표준상태의 조건에 일치되었다면, 부피 측면에서 약 843배가 증가한 것이다. Table 4에서 A의 체적유량에 843배를 부여할 경우 약 0.156 m<sup>3</sup>/h이며, 표준상태로 환산한 선도(Fig. 7)의 0.153 S.m<sup>3</sup>/h 대비 2%의 오차를 보임을 알 수 있다.

Table 4에서 칼럼 B를 보면 기체산소가 표준상태의 유동으로 발생할 경우, 칼럼 A 대비 밀도는 826배의 차이를 보이게 된다. 그러나 질량유량은 같으므로 표준상태로 환산되면 결국 칼럼 A와 B의 체적유량은 같음을 알 수 있다. 이와 더불어 Table 4의 칼럼 C의 경우도 마찬가지다. 헬륨인 관계로 질량유량은 적게 발생하나 당시 밀도 또한 매우 낮게 분포하므로 Table 4의 칼럼 A 및 B, C의 표준유량 결과는 동일하다. 따라서 극저온 10 ml/s의 헬륨 누설량을 표준유량으로 환산시 약 0.153 S.m<sup>3</sup>/h 이다. 그러므로 Fig. 7의 x축 100 ml/s이하에서는 Test 선도 보다 오히려 Calculation의 선도를 더 신뢰할 수 있게 된다.

Figure 1과 같이 시제품을 액체질소가 채워진 용기에 잠기게 한 후 내부에 헬륨을 가압하여 마우스피스 방법으로 누설량 시험하는 경우와 액체 산소와 헬륨의 누설량 결과를 정리하면 Table 5와 같다. Table 5에서 액체상태의 산소 누설량이 1 g/s이라면 헬륨의 누설 체적유량은 174 ml/s 크기의 비율을 갖는다.

### III. 결 론

시제품의 누설량 측정방법에서 시험유체가 산소이고 요구조건의 측정단위가 질량유량인 경우, 고가의 시험장비 이용과 측정방법 등에서 어려움이 있었다. 이를 극복하기 위해 산소와 헬륨간의 상사성 실험을 수행했고 실험결과를 근간으로 한 관계식을 정립했다. 상사성 식을 이용하면 질량유량을 체적유량으로 정확하면서 용이하게 환산할 수 있다. 기체헬륨과 액체산소간의 상사 관계를 정리하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 상온상태의 산소 질량유량[g/s]은 헬륨 체적 유량[A.ml/s]의 0.000489배 이다.
2. 상온상태의 산소 체적유량[A.ml/s]은 헬륨의 체적유량[A.ml/s]의 3.9배 이다.
3. 액체상태의 산소 누설에 대한 질량유량[g/s]은 헬륨의 누설 체적유량[A.ml/s]의 174배 이다.
4. 연관식을 미국 국립기술표준원에서 제시한 자료를 근거로 검증하였다.
5. 표준유량과 질량유량의 정립된 상관관계를 이용하여 다양한 기체의 유량 또는 누설량 관계를 정량화할 계획이다.

## References

- 1) Shnyakin, V., Design Documentation Technical Specification and Analyses of the Lox Supply System and Its Components for Cryogenic L.R.E, YUZHNOYE Design Office, 2009.
- 2) Lee, J. Y. and Jung, T. K., "The Developing Trend of valves for Liquid Rocket Engine", *Journal of the Current Industrial and Technologic Trends in Aerospace*, Vol. 2, 2009, pp.14~24.
- 3) EMERSON. Process Management, Flow Curves and Calculations, Technical Information of Tescom Regulator, 2012.
- 4) Lee, J. Y., Conversion of Volumetric Flow at Gas Flow, CSG-LJY-04-012, Design Memo, 2004.
- 5) Miller, D. S., Internal Flow System, The Fluid Engineering Centre, Inc., 1990.
- 6) McCloy, D., Martin, H. R., Control of Fluid Power : Analysis and Design, John Wiley & Sons, 1980.
- 7) Jamnes E., John, A., Gas Dynamics, Allyn and Vacon, INC., 1984.
- 8) Lee, J. Y. and Lee, S. Y., "Experiment and Performance Prediction on Inherent Flow Coefficient of a Solenoid Valve", *Journal of the Aerospace Engineering and Technology*, Vol. 1, Jun. 2011, pp.70~78.
- 9) Lee, J. Y., Leakage Test of Oxygen and Helium, CSG-LJY-11-010, Design Memo, 2011.
- 10) Lee, J. Y., Using a Cryogenic Fluid Heat Exchanger Valve Leakage Measuring Device, Patent Number 10-1445751, 2014.
- 11) Huh, H. I., Experimental Study of Similarity between Helium Leakage Volume and Liquid Oxygen Leakage, Researches Commissioned by a KSLV-II, 2013.
- 12) <http://webbook.nist.gov/chemistry/>