

## 다공 오리피스를 이용한 액체산소 유량측정

임하영<sup>\*†</sup>, 이지성<sup>\*</sup>, 김정한<sup>\*</sup>, 노용오<sup>\*\*</sup>

### Flow Measurement of Liquid Oxygen using the Multi-hole Orifice

Hayoung Lim<sup>\*†</sup> · Jisung Lee<sup>\*</sup> · Junghan Kim<sup>\*</sup> · Yongoh Noh<sup>\*\*</sup>

#### ABSTRACT

To measure the flow rate of the liquid oxygen, two types of multi-hole orifice meter were prepared. The  $C_d$  of the orifice meter was determined by the flow test using water. After performing the liquid oxygen flow test for orifice meter and Coriolis meter, the mass flow rate was calculated using the  $C_d$ . The error of the mass flow rate compare to Coriolis meter, A-type(1/2") was below than 0.4%, B-type(3/4") was below than 0.8%.

#### 초 록

액체산소의 유량을 측정하기 위해 두 가지 형태의 다공성 오리피스 미터를 제작하여 물을 이용하여  $C_d$  를 측정하였다. 다공 오리피스 미터와 코리올리 미터를 직렬로 연결하고 액체산소를 흘려보내는 유동시험을 수행하여 물을 이용하여 구한  $C_d$  를 이용하여 질량유량을 산출하였다. 코리올리 미터를 기준으로 할 때 A 형(1/2")의 경우 0.4%, B 형(3/4")의 경우 0.8% 이하의 오차를 확인하였다.

Key Words: Orifice Meter(오리피스 미터), Multi-hole Orifice(다공 오리피스), Liquid Oxygen(액체산소), Mass Flow Meter(질유량계), Discharge Coefficient(배출계수)

#### 1. 서 론

우주발사체 뿐만 아니라 일반 산업용 장치의 제어 및 성능 측정에서 가장 중요한 것 중의 하나는 정확한 유량 측정이다. 압력이나 온도 등은 하나의 측정 장치로 측정을 하여 비교적 간단하

지만 유량, 특히 질유량은 압력과 온도를 이용하여 계산이 이루어지기 때문에 정확한 측정이 쉽지 않다. 물론 코리올리스 유량계를 이용하면 정확한 질유량을 측정할 수 있지만 다른 유량측정 장치에 비해 크기가 크고 가격이 비싼 단점이 있다. 터빈 유량계는 크기도 작고, 가격도 저렴하며 응답속도도 빠른 장점이 있으나 정확한 측정을 위해선 유량계 전후단의 직관부가 상당히 길어야 하기 때문에 한정된 공간에 설치하기 어

\* 한국항공우주연구원 발사체추진제어팀

\*\* 비즈로테크 액체로켓연구실

† 교신저자, E-mail: hylim@kari.re.kr

럽다. 오리피스 유량계는 오리피스 전후단의 차압을 측정하여 베르누이 정리에 의해 유량을 측정하는 장치로, 오랜 기간 단순한 형상과 저렴한 비용으로 일반 산업현장에서 널리 사용되고 있다. 그러나 오리피스 유량계는 정확한 측정을 위해선 오리피스 전후단에 상당한 길이의 직관부가 필요하기 때문에 한정된 공간에 설치가 곤란한 단점이 있다.

다공 오리피스를 이용한 유량계는 기존의 구멍이 하나인 오리피스와 달리 여러 개의 구멍을 가진 오리피스를 이용한 측정 방법으로 미국 NASA에서 우주왕복선 엔진의 유량을 측정하기 위해 개발된 장치로 Balanced Flow Meter(이하 BFM으로 칭함)로 불리며[1], Rosemount에서는 네 개의 구멍을 가진 오리피스를 conditioning orifice 유량계라고 하여 판매를 하고 있다[2]. NASA와 Rosemount에서는 이러한 유량계의 장점으로 오리피스 전후단의 직관부가 배관의 두 배로 일반 오리피스에 비해 아주 작은 공간만을 필요로 하며 일반 오리피스의 규격을 만족한다고 한다[1, 2, 3]. NASA에서는 우주왕복선의 액체로켓엔진에 공급되는 액체산소 유량을 측정하기 위해 터빈유량계를 사용하였다가 시험 중 터빈 블레이드가 파손되면서 사고가 발생하여 이를 대체하기 위해 BFM을 개발하였다고 소개하고 있다. 그러나 이러한 형태의 오리피스는 유량 측정장치에서 유동을 균일하게 만들어주는 flow conditioner라고 하여 사용이 되고 있었으며 NASA에서는 이것의 전후단 차압을 측정하여 유량측정장치로 사용한 것으로 보인다. 현재 BFM은 NASA에서 업체로 기술이전이 되어 2000년대 이후 우주발사체 분야뿐만 아니라 원자력 등의 분야로 확대 적용되고 있다[2].

본 논문에서는 향후 액체로켓엔진의 유량을 측정하기 위해 여러 개의 구멍을 가지는 다공 오리피스를 제작하여 물과 액체산소로 유량을 측정하여 이에 대한 적용 가능성을 확인하고자 한다.

## 2. 오리피스 유량계 원리 및 다공 오리피스 형상

오리피스 유량계는 오리피스 전후단의 차압을 측정하여 베르누이 정리에 따라 Eq. 1에 의거하여 유량을 구한다[3].

$$\dot{m} = C_d A E_v Y \sqrt{2\rho \Delta P} \quad (1)$$

여기에서  $C_d$ 는 배출계수,  $A$ 는 오리피스 면적,  $E_v = 1/\sqrt{1-\beta^4}$ ,  $\beta = d/D$ 는 오리피스 직경과 배관 직경의 비,  $\rho$ 는 오리피스 입구에서의 밀도,  $\Delta P$ 는 오리피스 전후 차압,  $Y$ 는 기체일 경우 압축성 인자이다. 식에서 볼 수 있듯이 유량에 영향을 미치는 인자는 오리피스의  $C_d$ , 유체의 밀도 그리고 차압이다. 베르누이 정리는 점성이 없는 이상유체로부터 유도된 식이지만  $C_d$ 는 유동의 레이놀즈 수에 따라 값이 변한다.

다공 오리피스는 제작과 측정이 쉽도록 쉽게 구할 수 있는 피팅을 사용할 수 있도록 1/2" (A형)와 3/4" (B형) 내경을 갖도록 설계하였으며 상세 치수는 Fig. 1과 같다. A형의 경우 배관의 내경은 9.45 mm이며 B형의 경우 배관의 내경은 14.6 mm이다. Table 1은 오리피스의 실제 내경과 이를 하나의 오리피스로 환산했을 때의 내경( $d_{i,eq}$ )과 이에 따른  $\beta$ 와  $E_v$ 를 보여준다.

Table 1. Dimension of the Orifice.

Type	$d_1$ (mm)	$d_2$ (mm)	$d_{i,eq}$ (mm)	$\beta$	$E_v$
A	2.495	1.948	6.05	0.64	1.015
B	6.04	2.507	9.31	0.638	1.095

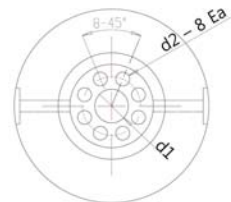


Fig. 1 Multi-hole orifice.

오리피스에 표준 피팅을 용접하여 제작한 다공 오리피스 미터는 Fig. 2와 같다.

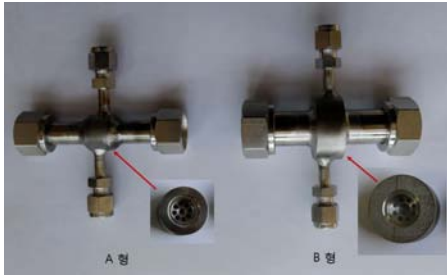


Fig. 2 Multi-hole orifice meter.

### 3. 유량 측정 실험

#### 3.1 물을 이용한 $C_d$ 측정

목표로 하는 액체산소의 유량은 A 형의 경우 최대 1 kg/sec, B 형의 경우 최대 3 kg/sec 로 하였다. 액체산소의 동점성 계수는 물에 비해 약 1/10 의 값을 가지므로 액체산소 유량조건의 레이놀즈 수와 비슷하게 물을 이용하여 시험을 하려면 물의 유속을 액체산소에 비해 열 배 이상으로 흘려보내주어야 한다. 이럴 경우 오리피스 전후에서 매우 큰 차압이 발생하여 실험이 어렵다. 따라서 시험설비에서 가능한 최대의 조건으로 유량을 흘려보내주고 차압을 측정하여 레이놀즈 수가  $\sim 1 \times 10^5$  부근에서 시험을 수행하였다. 시험장치 구성은 Fig. 3과 같으며 물은 고압의 공기를 일정한 압력으로 가압한 상태에서 출구에 있는 유량조절 밸브를 작동시켜 유량을 변경하면서 시험을 수행하였다. 코리올리 유량계는 Emerson의 Micro Motion Elite CMF100을 사용하였으며 측정 오차는 0.1% 이다. 오리피스 입출구로부터 10D 이상의 직관이 연결된 상태로 시험을 수행하였다.

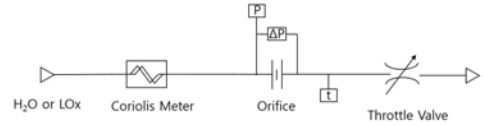


Fig. 3 Schematic of the flow test.

질유량은 차압의 1/2 승에 비례하기 때문에 차압이 작을 경우 작은 오차에도 변동 폭이 크므로 차압센서 스펬의 20% 이하의 값은 계산에서 제외하였다. 시험 결과 레이놀즈 수에 따른 유량계수는 Fig. 4, 5와 같다.

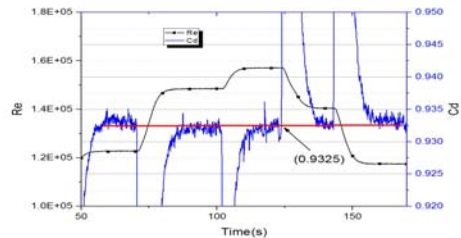


Fig. 4  $C_d$  and Re No. of the type A orifice.

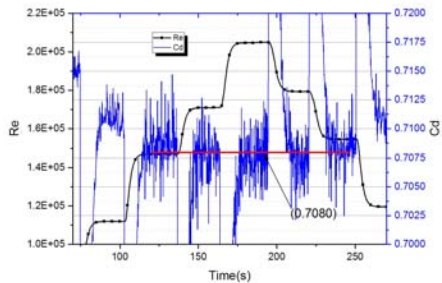


Fig. 5  $C_d$  and Re No. of the type B orifice.

레이놀즈 수에 따라  $C_d$  값에 약간의 변화가 있으나 일정한 경향을 찾기는 용이하지 않으므로 평균값을 취하여 A 형의 경우엔  $C_d$  값을 0.9325 로 정했으며, B 형의 경우 0.7080 으로 정하였다.

#### 3.2 액체산소 유량측정

물을 이용하여  $C_d$  값을 측정한 오리피스를 액체산소를 이용하여 실제 액체로켓엔진이 작동하는 유량조건과 유사한 상태에서 시험을 수행하였다. 시험 장치는 Fig. 6와 같은 구성을 하여 일정한 압력으로 액체산소를 7 MPa 정도에서 가압한 상태에서 출구에 있는 유량조절밸브를 이용하여 유량을 변경하면서 시험을 수행하였다. 시험에 사용한 코리올리 유량계는 Micro Motion Elite CMF100 제품 중 극저온용을 사용하였으며 0.1%의 측정 오차를 갖는다. 시험 결과는 Fig. 7, Fig. 8과 같다. 온도는 T type 열전대를 사용하였다.

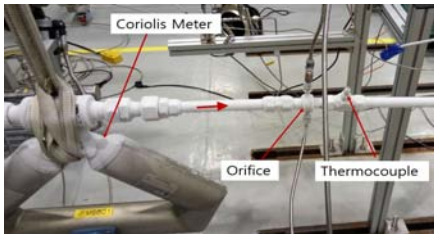


Fig. 6 Cryogenic flow test apparatus.

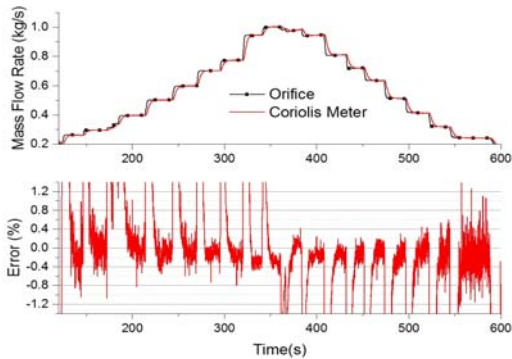


Fig. 7 LOx flow test result of the type A orifice.

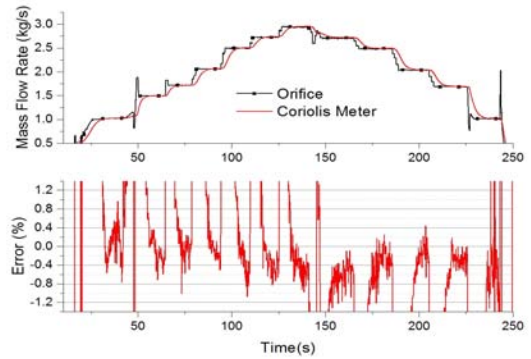


Fig. 8 LOx flow test result of the type B orifice.

오리피스를 이용한 유량 산출 시 밀도는 오리피스 입구 압력과 출구 온도를 사용하여 미국 NIST REFPROP 프로그램을 이용하여 구하였다. 오리피스 유량계를 이용한 유량 산출 시 입구의 밀도를 사용하여야 하나 실험에 사용하는 배관의 지름이 작기 때문에 입구에 온도 측정을 위한 열전대를 장착하면 압력 측정에 영향을 미치므로 열전대는 오리피스 후방에 장착하였으며, 액체산소의 온도는 오리피스 입구와 출구에서 큰 차이가 없으므로 밀도에 미치는 영향이 매우 작다. 코리올리 미터를 기준으로 삼고 이에 대한 오리피스 유량계의 차이를 오차로 할 때 결과는 Fig. 7과 Fig. 8의 아래 그래프와 같다. A 형의 경우 유량이 0.2 ~ 1.0 kg/sec의 범위에서 코리올리 유량계와 비교할 때 0.4% 이내의 정확도를 가짐을 보여주며, B 형의 경우 유량이 1.0 ~ 3.0 kg/sec의 범위에서 0.8% 이내의 정확도를 보여 준다.

#### 4. 결론

오리피스 설치 요구조건이 까다롭지 않은 다공 오리피스에 대하여 물로 수력학 특성시험을 수행하여  $C_d$  값을 측정하였다. 액체산소에 대하여 유량시험을 수행하고 물을 이용하여 구한  $C_d$  값을 이용하여 액체산소의 유량을 산출하였다. 유량계 전후단에 충분히 긴 직관이 필요한 터빈

유량계의 오차가 0.5% 내외임을 감안할 때 단순한 형태와 작은 공간을 요구하며 높은 측정 정밀도를 갖는 다공 오리피스는 액체로켓엔진의 유량측정에 최적화된 측정장치로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. Anthony R. Kelley, "Balanced Flow Metering and Conditioning Technology for Fluid Systems(Space Liquid Propulsion Systems)," Instrumentation Symposium for the Process Industries, 2006.
2. Graftel Balanced Flow Meter, [www.graftel.com](http://www.graftel.com)
3. EMERSON Process Management, Theory of DP Flow, March 2015