

# 코리올리 유량계를 이용한 정밀유량측정에 관한 연구

김인태\* · 조대기\* · 정민제\* · 이재원\* · 서혁\* · 유명종\*\*

## A Study of the Precise Flow Measurement using Coriolis flowmeter

In-tae Kim\* · Dae-kee Cho\* · Min-je Jeong\* · Jae-won Lee\* · Hyuk Seo\* · Myoung-jong Yu\*\*

### ABSTRACT

For the performance evaluation of liquid mono-propellant thruster, Vacuum Hot-fire test is necessarily required. An accurate flow measurement is one of the key parameters to the successful T&E program. This paper describes the characteristics of the coriolis flowmeter, explains the cold-flow test using simulant propellant (DIW), and presents the test results. Finally, the cold test results have been verified in comparison with the hot-fire test data.

### 초 록

액체추진제 추력기의 경우, 성능평가를 위해 진공연소시험이 필수적으로 요구되며 이때 공급되는 추진제의 유량이 비추력 계산시 중요한 영향을 미치는 인자가 된다. 본 논문에서는 정밀 유량측정에 대한 기초연구로서, 코리올리 유량계를 이용하여 모의추진제인 DIW를 사용한 수류시험을 수행하였으며 연속모드 및 펄스모드 각각에 대해 결과분석이 이루어졌다. 마지막으로 해외연소시험 데이터와의 비교를 통해 수류시험 결과와의 검증을 확인하였다.

Key Words: Coriolis Flowmeter(코리올리 유량계), 유량측정(Mass Flowrate Measurement), 수류시험(Water Cold-Flow Test)

### 1. 서 론

일반적으로 유체의 질유량을 측정하는 유량계는 기계식 유량계와 전기/전자식 유량계 등으로 구분된다. 기계식으로 대표되는 터빈식 유량계

(Turbine Flowmeter)는 유체의 흐름을 터빈 블레이드의 회전수로 기계적으로 측정후 주파수로 변환하여 이를 다시 유량으로 환산하게 된다. 이에 비해 전자식 유량계로 대표되는 코리올리 유량계(Coriolis Flowmeter)는 전자식 코리올리 효과를 이용해 측정하게 된다. 코리올리 효과란 회전하는 물체의 질점이 회전 중심쪽으로 방향을 향하거나 멀리 떨어져 있는 물체에 대응하여 운동 관성력이 생긴다는 원리이다.

\* (주)한화

\*\* 한국항공우주연구원

연락처, E-mail: itkim9057@hanwha.co.kr

위성의 자세제어용으로 주로 사용되는 액체추진제 추력기의 경우, 성능평가를 위해 진공연소시험이 필수적으로 요구되며 이때 공급되는 추진제의 유량을 측정하여 추력기의 비추력(Specific Impulse) 계산시 사용된다. 위성용 추력기의 시험유량은 추력기의 추력레벨 및 공급압력에 따라 달라지며 국내에서 시험되는 추력기의 유량은 3g/s 이하이다. 공급되는 추진제의 유량이 워낙 적은 양이라 유량 측정시 발생하는 부정확성이 추력기의 성능평가에 직접적으로 영향을 미치는 인자가 된다. 한 예로, 터빈식 유량계의 경우 유량계의 측정범위는 만족하나 실제 시험시 저유량에서는 부정확한 특성을 보이며 유량계 전후의 차압( $\Delta P$ )도 크게 발생한다. 이에 비해 코리올리 유량계의 경우에는 차압이 거의 발생되지 않고 터빈식 유량계에서는 수행하기 어려운 펄스시험이 가능하여 시험설비의 단순화 및 이로 인해 운용상의 장점 등을 갖고 있다.

본 논문에서는 위성용 추력기의 시험평가지 필수적으로 요구되는 정밀 유량측정에 대한 기초연구로써 기존의 터빈식 유량계를 대체할 코리올리 유량계 특성 및 이를 이용한 수류시험 결과, 그리고 해외시험설비에서의 코리올리 유량계 적용 데이터 분석/비교에 대해 기술하고 있다.

## 2. 코리올리 유량계 특성

코리올리 유량계는 회전하는 물체의 질점이 회전 중심쪽으로 방향을 정하거나 멀리 떨어져 있는 물체에 대응하여 운동할 때, 관성력이 생긴다는 원리로 작동한다[1]. 이 원리는 Fig. 1과 같으며 한국 산업규격의 코리올리 유량계의 선정, 설치 및 사용 지침에 언급된 내용을 요약하면 다음과 같다.

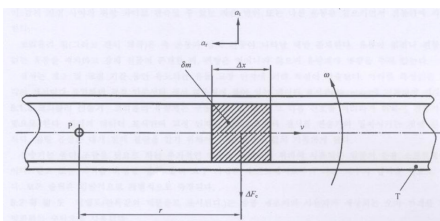


Fig. 1 코리올리 유량계의 작동원리[1]

질량 질점  $\delta m$ 은 고정점 P에 대해 각속도  $w$ 로 회전하는 관 T속에서 일정 속도  $v$ 로 미끄러지듯 움직인다. 이 질점은 원심가속도와 수평가속도의 두 가지 성분의 가속도를 받는다. 질점의 코리올리 가속도  $a_t$ 를 나누기 위해서  $2w \cdot v \cdot \delta m$ 이라는 힘의 크기가  $a_t$ 의 방향으로 필요해지며 진동관은 이 힘을 질점에 가한다. 이 질점은 코리올리의 힘이라 불리는 등가 힘으로 이 힘에 작용한다. 따라서 코리올리 힘  $\Delta F_c$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta F_c = 2w \cdot v \cdot \delta m \quad (1)$$

따라서 진동관에 흐르는 유체가 받는 코리올리 힘의 직·간접적인 측정은 질량 유량의 측정을 제공하며 이것이 코리올리 유량계의 동작원리이다.

상업적 용도로 설계된 코리올리 유량계에서는 관성력이 관성 회전 운동에 의해서라기보다는 관을 진동함으로써 발생한다. 관을 일정하게 진동하도록 유지하기 위하여 필요한 최소의 유도힘은 진동수가 꼭 채워진 관의 고유 진동수와 같거나 거의 비슷할 때 발생한다. 대부분 유량계의 유입관은 두 개의 지점사이에 고정되고 이들 두 개 지점의 중간지점에서 진동한다. 코리올리 유량계는 구동력을 제공하고 신호처리를 위해 전송기를 필요로 한다. 이때 센서의 데이터 표시판에 교정 인자를 입력함으로써 센서를 전송기와 일치시키는 것이 중요하다. 참고로 본 시험에 사용된 유량계의 경우, Emerson사의 Micro-Motion CMF010 모델을 이용하였다.

## 3. DIW를 이용한 수류시험

위성용 추력기의 시험평가지 요구되는 시험 시퀀스는 연속모드와 펄스모드의 두 경우를 모두 포함한다. 국내에서는 연속모드(SSF)의 경우 터빈 유량계를 이용하여 유량을 측정하고 있으며 펄스모드(PMF)의 경우에는 저울을 이용한 무게 측정법이 사용되고 있다. 코리올리 유량계에 대한 적용여부를 판단하기 위해서는 실유체를 이용한 연소시험이 요구되나 추진제의 취급 등의 문제로 인해 모의추진제인 DIW(De-Ionized Water)를 이용해 수류시험이 진행되었다.

### 3.1 시험조건 및 방법

추력기의 연소시험시 유량의 경우에는 공급되는 압력에 비례하여 증가하게 된다. 비행용 하드웨어의 경우에는, 시험 시퀀스에 의한 공급압력 설정 후 유량제어밸브(FCV)가 열림과 동시에 추력기의 주입기(Injector) 압력손실에 의해 유량이 결정되지만 본 수류시험에서는 FCV 전단에 수동조절밸브를 설치하여 원하는 유량을 조절하였다. 시험유량 설정후에는 SSF와 PMF 각각에 대해 압력설정을 연소시험과 동일하게 하였으며 (400, 250, 100, 50 psia) 유량계 값과 메스실린더를 이용해 Catch & Weigh(중량법)과의 비교를 통해 검증하였다. 수류시험은 총 2차에 걸쳐 진행되었으며 1차시험의 시퀀스는 SSF 60초, PMF 60펄스(ON/OFF시간이 250/750ms)로 이루어졌으며 이는 연소시험 시퀀스(SSF 60초, PMF 50/4950ms 100펄스)와 비교하여 SSF는 동일하게 하였으나 PMF는 데이터검증의 편이성을 위해 On-time을 크게하였다. 유량계의 적용가능성을 확인한 이후 2차시험에서는 장기시험의 가능성을 고려하여 SSF 300초, PMF는 1차시험보다 On-time을 줄여 연소시험 시퀀스와 동일한 100 펄스(ON/OFF시간이 50/4950ms)의 시험조건을 갖고 수행하였다.

### 3.2 시험결과

1차시험에서는 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 SSF에서는 균일하게 유체의 유량이 측정됨을 확인할 수 있으며 PMF의 경우에는 FCV On-time을 250ms으로 하여 밸브 개폐신호(FSIG)에 맞추어 압력대별로 일정하게 측정됨을 볼 수 있다.

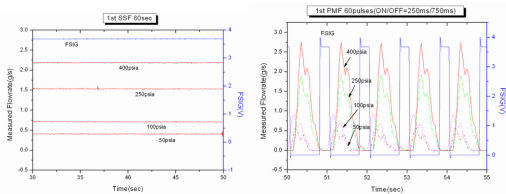


Fig. 2 1차 수류시험에서의 유량변이

2차 수류시험에서는 SSF시간을 300초로 늘였으며 PMF의 경우에는 FCV On-time을 50ms으

로 하여 진행하였다. 앞서 설명한 것처럼 수류시험의 방법 및 목적이 유량계에서 측정된 값과 실제 저울을 사용해 Catch & Weigh값과의 비교를 통해 유량계의 정확성(accuracy) 및 재현성(repeatability)을 살펴보고자 함이므로 SSF의 시험시간을 1차보다 길게 하였다. 이에 대한 결과는 표 1에서 확인할 수 있는데 각각의 시험압력에서 SSF, PMF에서의 측정된 유량계의 값과 메스실린더를 이용한 저울값과의 비교를 정리하였다. SSF의 경우에는 50psia를 제외한 압력에서 전체적으로 0.1%내외의 높은 정확도를 확인할 수 있었으며 50psia의 경우에도 0.6%내외의 정확도를 나타내나 이는 300초 동안 측정된 전체 유량의 감소로 인한 오차의 증가로 판단된다. PMF의 경우에는 SSF보다 그 차이가 좀더 커짐을 확인할 수 있는데, 압력이 감소할수록 편차가 증가하여 100psia의 경우에는 20%정도까지 증가함을 볼 수 있다. 50psia의 경우에는 편차가 2배 이상 발생하였으며 이는 저압력에서 50ms 짧은 펄스에 대한 유량계의 부정확성뿐만 아니라 총 100펄스 중 10개 펄스만을 추출하여 평균값에 이용된 점, 그리고 실험시 기인된 오차원인(예를 들어, 메스실린더로 계량시의 오차 및 유량계의 측정포인트와 메스실린더로 받은 Weighing 포인트의 거리차 등)이 종합적으로 영향을 주었을 것으로 여겨지나 이에 대해서는 추가적인 실험/분석이 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 해외시험 데이터 비교

국내에서는 본 유량계를 이용해 추력기 연소시험에 적용한 예가 없기 때문에, 2007년도에 해외시험설비에서 동일한 모델을 이용해 수행된 연소시험 데이터[2]와 본 수류시험 결과와의 비교/분석을 진행하였다.

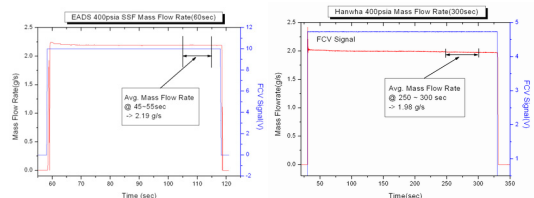


Fig. 3 SSF에서의 연소시험과 수류시험 결과비교

Fig. 3에서 보는 바와 같이 SSF의 경우에는 해 외연소시험 및 국내수류시험 모두 FCV의 열림과 동시에 일정한 유량값이 지속적으로 계측됨을 확인할 수 있다. PMF의 경우에는 Fig. 4에서 제시하는 바와 같이 400psia에서의 ON/OFF시간이 50/4950ms일때의 결과값을 나타내었다. 실추진제와 모사추진제와의 차이에도 불구하고 유량, 주입압력 변이 등이 거의 유사함을 볼 수 있으며 이로 인해 코리올리 유량계를 이용한 SSF, PMF에서의 수류시험결과가 연소시험결과와 상사성(Similarity)을 갖는다고 볼 수 있겠다.

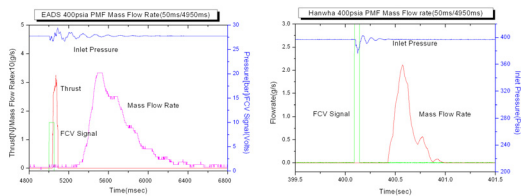


Fig. 4 PMF에서의 연소시험과 수류시험 결과비교

## 5. 결 론

본 연구에서는 위성용 추력기의 시험평가시 필수적으로 요구되는 정밀 유량측정에 대한 기초연구로써 코리올리 유량계 특성 및 이를 이용한 수류시험 결과, 그리고 해외시험설비에서의 코리올리 유량계 적용 데이터 분석/비교에 대해

기술하였다. 유량계에 대한 적용여부를 판단하기 위해서는 실유체를 이용한 시험이 요구되나 추진제의 취급 등의 문제로 인해 모의추진제인 DIW를 이용해 수류시험을 실시하였다.

결론적으로, 터빈식에서 단점으로 야기되었던 저유량계측시 부정확성과 큰 차압 등의 문제는 코리올리 유량계에서는 거의 발생되지 않고 PMF시험도 가능한 것으로 판단되어 시험설비의 단순화 및 운용상의 이점을 얻을 수 있을 것으로 본다. 다만 SSF에서 발생된 유량계 계측유량과 저울로 환산된 유량과의 차이는 보정계수(Correction Factor)를 통해 실유량보정이 가능할 것으로 판단되며 일부 저압력에서 큰 차이를 보이는 PMF의 경우에는 다양한 Duty Cycle에 따른 보정데이터(Calibration Data)의 확보 및 적용이 필요할 것으로 여겨진다.

## 참 고 문 헌

1. 한국산업규격 KS B ISO 10790, "코리올리 유량계의 선정, 설치 및 사용지침", 2003.
2. EADS Test Report, "Test Data Analysis of Acceptance and Protoflight Hot Run 0.95lbf Monopropellant Hydrazine Thruster MRE-1", TP47-K3-TN-07-001, 2007.

SSF (300초)					PMF (50/4950ms, 100pulses)			
Pinj(psia)	Mea. $\dot{m}$ (g/s)*	Weight(g)	Weight $\dot{m}$ (g/s)	(M-W)/M*100(%)	Mea. $\dot{m}$ (g/p)**	Weight(g)	Weight $\dot{m}$ (g/p)	(M-W)/M*100(%)
408.0	2.0980	629.94	2.0998	-0.0855	0.3992	42.33	0.4233	-6.0371
390.7	2.0851	625.44	2.0848	0.0121	0.3919	40.70	0.4070	-3.8530
250.0	1.5118	453.21	1.5107	0.0743	0.3451	37.00	0.3700	-7.2153
249.1	1.5055	451.40	1.5047	0.0542	0.3400	37.64	0.3764	-10.7059
99.7	0.6964	208.70	0.6957	0.1024	0.2459	29.66	0.2966	-20.6181
99.2	0.6970	208.94	0.6965	0.0827	0.2367	28.57	0.2857	-20.7013
52.7	0.4463	134.48	0.4483	-0.4377	0.0566	21.85	0.2185	NA
52.2	0.4475	135.10	0.4503	-0.6361	0.1124	22.75	0.2275	NA

표 1 연속모드 및 펄스모드에서의 유량계 계측유량과 저울을 이용한 유량값 비교

\* SSF에서의 Pinj, Mea.  $\dot{m}$  값은 250~300초사이의 평균값을 이용

\*\* PMF에서의 Mea.  $\dot{m}$  값은 80~90 펄스(400~450초)의 적분값(Integral Value)의 평균값 이용