

<技術論文>

소형 푸루버의 유량계 검증 오차 연구

백종승* · 임기원* · 최용문**

(1989년 11월 8일 접수)

Study on Flowmeter Proving Errors of a Small Volume Prover

J.S. Paik, K.W. Lim and Y.M. Choi

Key Words : Small Volume Prover(소형 푸루버), Flowmeter Proving(유량계 검증) Pulse Interpolation(펄스보간), Water Draw Method, Master Meter Method, Basic Volume(기본부피) Turbine Meter(터빈미터), Bulk Meter(용적식 유량계), Vortex Flowmeter(와류유량계)

Abstract

Leaks at the piston seal and the by-pass port of a small volume prover have relatively large influence on the proving accuracy in comparison with a conventional ball prover. The pulse interpolator, which is to increase the discrimination, is affected by the characteristic of the flowmeter signal. In this study, a small volume prover of the double cylinder type was designed in order to study the pulse interpolation error as well as the leak error. The basic volume of the prover determined by a water draw method was about 9.68L. Experimental results revealed that interpolation data attained by the repeated piston pass for turbine meters at a fixed flowrate may be treated effectively by applying a statistical method. It was possible to limit the pulse interpolation error less than $\pm 0.02\%$ at the 95% confidence level. However, in the case of the bulk meter, it failed to achieve the required repeatability level because of the pulse characteristics. The basic volume change appeared to be independent of the piston velocity within the $\pm 0.05\%$ of tolerance.

1. 서 론

석유화학 산업체에서의 유량계 현장검증에는 볼 푸루버가 널리 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 소형이면서 자동화되어 보다 신속하게 볼푸루버와 동일한 수준의 정확도로 유량계를 검증할 수 있는 소형 푸루버가 개발되어 종래의 볼푸루버를 대체하고 있다.

소형 푸루버는 같은 용량의 볼푸루버보다 기본부피(basic volume)가 매우 작기 때문에 피스톤시일

이나 우회 밸브에서의 누설이 유량계 검증 정확도에 미치는 영향이 상대적으로 크다. 그리고 유량계 검증시 푸루버가 검증대상 유량계로부터 수집할 수 있는 펄스 수에 제한받기 때문에 시험분해능을 높이기 위해 펄스 보간법의 도입이 불가피하다.

Groeneveld 와 Jelff⁽¹⁾는 기본부피 100L의 Waugh회사 제품의 소형 푸루버에 대하여 피스톤 이동속도가 누설에 미치는 영향을 실험하였다. 실험방법은 약 0.0009m/s의 낮은 피스톤 속도에서 water draw방법에 의하여 푸루버의 기본 부피를 결정한 후 이 값을 피스톤 속도 0.06m/s, 0.12m/s에서 마스터 미터 방법에 의하여 결정된 기본 부피값과 비교하였다. 그 결과 위와같이 1m/s보다

*정회원, 한국표준연구소 유량연구실

**한국표준연구소 유량연구실

낮은 피스톤 이동속도 범위에서는 피스톤 시일에서의 누설 때문에 발생하는 기본부피 변화가 무시할 수 있는 정도인 것으로 밝혀졌다.

영국 NEL의 Paton⁽²⁾은 Brooks회사 제품인 compact prover의 성능을 평가하는 과정에서 피스톤 이동속도에 따른 피스톤 감지 스위치의 피스톤 감지 오차를 레이저 간섭장치로 측정하였고, 피스톤 이동시 마찰에 의한 피스톤 양단에서의 압력손실을 보상하기 위한 압력보조장치를 이용하여 피스톤 시일에서의 누설을 방지하는 방안을 제시하였다. 그는 피스톤에 인위적으로 직경 2mm의 구멍을 뚫은 후에도 압력보조장치를 이용하여 피스톤 양단에서의 압력차를 거의 없애줌으로써 누설에 의한 기본부피 변화를 0.1%이하로 줄일 수 있음을 실증하였다.

펄스보간법을 사용하여 펄스를 측정할 때 유량계로부터 전송되는 펄스의 주기가 항상 일정하면 이론상 펄스측정 분해능을 무한하게 향상시킬 수 있다. 그러나 유량계를 검증할 때 유량계로부터 전송되는 펄스는 그 주기가 일정하지 않고 변동한다. 즉 회전내 비직선성(intra-rotational-non-linearity : IRNL)에 의하여 결정되는 펄스주기의 변동특성에 따라 똑같은 유동 조건에서도 유량계 종류에 따라 펄스 보간오차가 달라진다. 특히 1000개 미만의 펄스를 측정하는 소형 푸루버의 경우 유량계 검증 오차가 상대적으로 크다. 이에 대한 대책으로 다수 반복하여 유량계 검증실험을 실시한 후 각각의 실험에서 펄스보간 방법으로 결정된 펄스 측정 결과의 평균값을 유량계 상수결정에 사용하는 방법이 관례화 되어 왔고, 또 마이크로프로세서를 이용하여 펄스측정 결과의 평균값이 원하는 신뢰도에서의 오차한계에 도달할 때까지 실험회수를 늘려가는 방안⁽³⁾도 강구되고 있다. 그러나 유량계 종류에 따라서는 실험을 되풀이하여 피스톤 행정을 계속 늘려가는 방법만으로는 원하는 펄스측정 재현도 확보에 실패하는 경우가 종종 발생하여 Paton⁽⁴⁾은 컴퓨터 모의실험에 의해 유량계에서 발생 가능한 펄스주기 변동 특성에 따라 변동 정도를 바꾸면서 각종 펄스 보간법을 적용하여 펄스주기 변동 정도별로 목표 펄스 보간재현도를 성취하는데 필요한 최소 펄스수를 예측하였다.

본 연구에서는 지금까지 개발된 각종 소형 푸루버의 작동원리 및 장단점을 분석 비교한 결과에 따라 이중 실린더형의 소형 푸루버를 직접 설계 제작

하고, 개발된 소형 푸루버를 사용하여 펄스 주기 변동특성이 각각 다른 유량계를 대상으로 펄스보간 오차 실험을 실시하였다. 실험결과는 통계적 방법을 도입하여 분석함으로써 유량계 각각에 대하여 기대 검증 정확도 수준을 선정하였다. 또 기대 검증 정확도가 좋지 않게 예상되는 유량계에 대해서는 검증 정확도 향상 방안을 제시하였다.

2. 소형 푸루버의 구조 및 작동원리

소형 푸루버는 유체로 충만된 파이프 내부의 일정구간을 피스톤이 유체의 유동에 따라 이동하면서 토출하는 유체의 부피 즉 기본부피를 기준으로 유량계의 정확도를 검증한다. 현재 상품화되어 있는 소형 푸루버는 피스톤이 들어있는 측정 실린더가 외부로 노출되어 있는 단일 실린더형과 시험유체로 채워져 있는 이중 실린더형의 두가지형태로 대별할 수 있다. 이들중 이중 실린더형이 온도 안정도가 좋고 시험유체의 압력변화에 따른 기본부피 변화를 보정할 필요가 없으므로⁽⁵⁾, 한국표준연구소에서는 설계시 이중 실린더형을 채택하였다.

한국표준연구소에서 설계 제작한 소형 푸루버는 Fig. 1과 같이 피스톤, 측정실린더, 피스톤 진수장치, 피스톤 감지스위치 D1과 D2, 유체 우회밸브 그리고 펄스 보간장치로 구성되어 있다. 측정실린더는 그 내부를 피스톤이 원활하게 움직일 수 있도록 진원도가 우수한 직공이어야 하고, 피스톤 시일은 피스톤 이동시 피스톤과 측정 실린더 벽면 사이에서 발생하는 유체의 누설을 방지할 수 있도록 설계 제작해야 한다. 따라서 측정실린더 내부 벽면은 경질 크롬 도금후 호닝(honing)처리하였고, 피스톤 시일은 테프론으로 제작한 V패킹을 이중으로

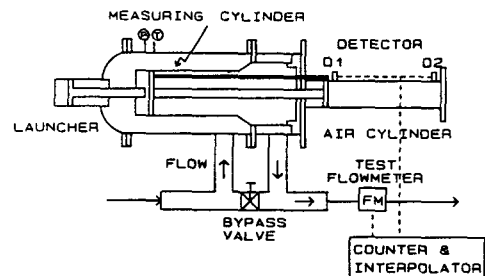


Fig. 1 Schematic drawing of the KSRI small volume prover

사용하였다. 푸루버의 기본 부피를 결정하는 피스톤 감지 스위치로는 재현성이 우수한 광학 스위치를 사용하였다. 또한 유량계 검증 행정을 끝낸 피스톤을 진수위치로 되돌려 보내는데 필요한 우회밸브는 누설 방지를 위해 double-block-and-breed 시스템⁶⁾을 채택하였다.

소형 푸루버는 기본부피가 작기 때문에 유량계의 검증시 수집할수 있는 펄스의 숫자가 적다. 따라서 펄스를 카운트할 때 분해능을 높이기 위한 펄스 보간장치가 필수적이다. 상업용 소형 푸루버들이 채택하고 있는 펄스 보간법으로는 이중시간측정법, 사중시간측정법, phase-locked-loop 방법⁶⁾등을 들 수 있는데, 그 중 재현성이 우수하고⁴⁾ 간편한 이중시간 측정법을 채택하였다. 소형 푸루버의 작동 순서를 살펴보면 다음과 같다. 유량계 검증 직전 준비 상태에서 피스톤을 by-pass port의 상류쪽에 위치하게 하고 우회 밸브를 닫는다. 우회 밸브가 닫힌 상태에서도 소형 푸루버로 유입되는 유체는 측정실린더에 꽂린 by-pass port를 통하여 푸루버 하류에 설치된 유량계를 통과하기 때문에 유량계는 펄스신호를 계속 발신한다. 유량계 검증을 시작하기 위하여 공기압으로 작동되는 진수 실린더를 이용하여 피스톤을 밀어주면 피스톤이 by-pass port를 지나게 되고 이때부터 피스톤 양단에는 차압이 발생하여 피스톤이 유체 유동을 따라 움직이다 하류측 확산부까지 도달한 후 멈춘다. 이때 피스톤에 부착된 측정막대가 피스톤과 같이 움직이면서 피스톤 감지 스위치 D1을 작동시키면 펄스 보간장치가 유량계 신호를 받아 측정을 시작하고, 피스톤이 계속 이동하여 스위치 D2를 작동시키는 순간 측정을 멈춘다. 펄스 보간장치에 기록된 펄스측정 결과는 피스톤이 D1과 D2 스위치에 의하여 결정되는 기본 부피에 해당하는 유체를 밀어내어 유량계를 통과 시킴으로써 발생하는 것이므로 푸루버 기본부피와 유량계 신호간의 상관관계를 규명할 수 있어 국가 표준으로 소급성을 유지하면서 유량계를 검증할 수 있다. 피스톤이 하류측 확산부에 완전히 멈추면 우회밸브가 열려 피스톤은 공기압에 의하여 진수위치로 회귀하여 다음 행정을 기다린다.

3. 실험방법

소형 푸루버의 주요 오차요인으로 유량계 검증시 피스톤 양단에 발생하는 차압에 의한 누설오차와

검증대상 유량계로부터 발생하는 펄스신호의 주기 변동때문에 유발되는 펄스보간 오차를 생각할 수 있다. 누설오차는 소형 푸루버의 기본 부피값에 영향을 미쳐 유량계 검증결과에 계통오차를 발생시키는 주 원인으로 작용하고, 펄스 보간오차는 유량계 검증 재현도에 크게 영향을 미치므로 다음과 같은 방법으로 각각의 오차실험을 실시하였다.

3.1 누설 실험

제작된 소형 푸루버의 특성 실험을 실시하기 앞서 피스톤 시일의 기밀실험을 행하였다. 우선 푸루버의 측정 실린더와 외부 실린더의 공기를 완전히 제거하여 물을 충전시키고 피스톤을 측정 실린더내의 임의의 점에 정지시켰다. 이때 피스톤에 부착된 측정봉의 신호 발생기는 광스위치 D1과 D2 사이에 위치시켰다. 다음에는 외부와 연결된 모든 밸브를 완전히 차단하고 30분 이상의 열평형 시간을 둠으로써 측정 실린더내의 유체 온도를 안정시켰다. 피스톤 양단의 차압은 피스톤의 회귀 행정을 위한 공기압 실린더에 압축질소를 가하여 발생시켰다. 압축질소는 질소 용기로부터 공기압 조절기를 통해 안정된 압력으로 공급되었는데 공급압력은 7×10^5 Pa로써 측정 피스톤 양단에 약 2.8×10^5 Pa의 차압을 발생시켰다. 실제 유량계 검증시 피스톤에 걸리는 차압은 0.2×10^5 Pa 이하이다. 누설로 인한 피스톤의 이동거리는 적어도 $1 \mu\text{m}$ 의 분해능을 가진 다이얼 게이지를 이용하여 측정하였다. 본 연구에서는 누설 실험을 6개의 피스톤 위치에서 되풀이하여 실시하였다.

3.2 펄스 보간오차의 실험

소형 푸루버에 장착된 펄스 보간장치는 유량계 실험에 앞서 장치 자체가 가지는 펄스 보간 정밀도를 평가하기 위해 주파수를 정확히 알고 있는 표준 펄스를 입력시켜 실험하였다. 실험방법은 1Hz부터 1kHz까지 변화시키면서 펄스 수집시간을 2s, 20s, 200s로 하여 각각의 펄스수집 시간에 대하여 펄스 보간을 행하였다.

유량계를 대상으로 하는 펄스 보간 오차실험은 푸루버의 하류측에 검증대상유량계를 설치하고 피스톤이 Fig. 1의 스위치 D1과 D2에 의하여 결정되는 기본 부피만큼의 물물 밀어낼때 유량계에서 발생하는 펄스수를 이중 시간 측정법에 의하여 측정하였다. 유량계 실험을 위한 푸루버와 유량계의 개

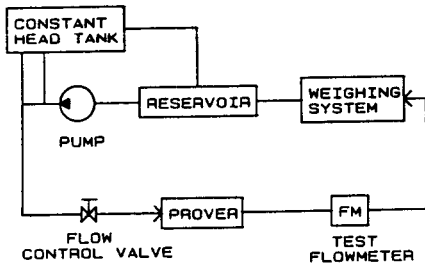


Fig. 2 Arrangement of gravimetric flow standard system

략적인 배치도는 Fig. 2와 같다.

실험대상 유량계에는 항상 $0.5 \times 10^5 \text{Pa}$ 이상의 배압이 걸리도록 유의하였고, 펄스보간 오차 실험 결과에 대해서는 통계 처리가 가능하도록 선정된 유량에서 실험을 되풀이하여 실시하였다. 실험 유량계로는 터빈미터와 베인형 벌크미터(Vane type Bulkmeter) 그리고 와유량계(Vortex Flowmeter)를 대상으로 선정하였는데 각각의 유량계에 대해 적어도 5개소 이상의 다른 유동물을 선정하여 펄스보간오차 실험을 실시함으로써 피스톤 이동속도 변화에 따른 펄스보간 오차 변화를 관찰하였다.

3.3 기본 부피 결정

정밀도 1/10000 이상의 전자식 저울과 백금저항 온도계를 이용하여 피스톤이 스위치 D1과 D2로 정의된 구간을 통과하면서 토출한 물의 질량과 온도 그리고 실내온도를 정확히 측정하는 water draw 방법⁽⁸⁾에 의해 푸루버의 기본 부피를 결정하였다. Water draw 실험은 피스톤 이동속도를 0.002m/s ~ 0.011m/s범위에서 변화시키면서 되풀이하여 그 결과를 비교하였다.

피스톤 이동속도 0.05m/s 이상의 유량에서는 마스터미터 방법⁽⁹⁾에 의해 피스톤 이동속도 변화에 따른 푸루버 기본부피 변화정도를 실험하였다. 마스터미터로는 접속구경이 각각 1"와 2"인 터빈 미터를 Fig. 2와 같이 푸루버의 하류쪽에 설치하여 사용하였다. 즉 중량식 표준장치에 의하여 결정된 미터 상수인 K 인자로 같은 실험 조건에서 푸루버에 의하여 유량계 검증 실험동안 유량계에서 발생한 펄스수를 펄스 보간법으로 카운트한 결과를 나누어주면 푸루버의 기본부피를 결정할 수 있다. 실험에 사용된 중량식 표준장치는 flying-start-and-finish 방법을 사용하는 동적 시스템⁽⁹⁾이고, 실험 최

대 유량에서의 피스톤 이동속도는 약 0.6m/s였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 누설실험

피스톤시일의 기밀 실험결과 피스톤을 정지시킨 상태에서는 측정 실린더의 임의의 어느 지점에서 차압을 $2.8 \times 10^5 \text{Pa}$ 까지 증가시켜도 누설에 의한 피스톤 이동이 5min동안 0.09mm 이상을 넘지 않음이 관찰되었다. 이는 제작된 푸루버의 유효 측정거리가 약 500mm임을 고려할 때 5min동안 피스톤시일을 통해 누설된 물의 양이 기본부피의 0.02% 미만으로 허용오차 이내임을 나타낸다. 더구나 실제로 유량계를 푸루버로 검증할 때 피스톤 양단에 발생하는 차압은 $0.2 \times 10^5 \text{Pa}$ 이하이므로 누설에 의한 기본부피 오차는 위의 실험보다 더욱 작을 것으로 예상되어 본 연구소에서 제작한 푸루버의 경우 피스톤 시일의 누설이 $\pm 0.02\%$ 의 허용오차 범위내에서 유량계 검증 정확도를 유지하는데 문제가 되지 않을 것으로 생각된다.

4.2 펄스보간 오차 실험

본 연구에서 제작된 소형 푸루버의 펄스 보간장치를 표준펄스로 성능평가한 결과 표준펄스 주파수가 펄스 보간오차에 영향을 미치지 않음이 밝혀졌다. 다만 수집시간이 2s 이내인 경우에는 수집시간이 20s, 200s인 경우들과 비교하여 비교적 낮은 정확도 수준인 $\pm 0.0035\%$ 의 펄스 보간오차를 보였다. 수집시간 20s, 200s에서의 펄스보간 오차는 각각 $\pm 0.002\%$, $\pm 0.001\%$ 였다. 따라서 본 연구에서 제작된 펄스보간장치는 표준펄스의 주파수에 관계없이 $\pm 0.0035\%$ 이내의 오차를 갖는 것으로 생각되며 이는 $\pm 0.02\%$ 이내의 오차로 펄스를 보간해서 카운트하기에 충분한 정확도 수준으로 생각한다.

그러나 유량계 검증시 유량계로부터 발생하는 펄스의 특성은 표준펄스 신호와는 달리 펄스 진폭이 항상 일정하지 않고 변동한다. 즉 유량계를 검증하는 동안 유량계로부터 발생하는 펄스신호의 주파수가 안정되어 있지 않다. 따라서 펄스 진폭의 변동 특성에 따라 펄스보간 결과가 영향을 받기 때문에 똑같은 유동조건에서도 유량계의 종류에 따라 펄스보간정확도가 다를 것으로 예상된다. 특히 재래식 푸루버와 달리 소형푸루버는 기본부피가 작아 유량계 검증시간동안 수집할 수 있는 펄스의 수에 제한

Table 1 Pulse interpolation error of the single pass proving experimebts

Flowmeter	Bore size	Frequency, Hz (flowrate, m ³ /h)	Uncertainty at the 95% confidence level (%)
Trubine meter (I)	1"	300 (6)	±0.09
	2"	200(27)	±0.04
Turbine meter (II)	1"	250(6.6)	±0.03
	2"	225(27)	±0.04
Bulk meter	3"	700(25)	±0.43
Vortex flowmeter	2"	115(24)	±0.45

을 받기 때문에 펄스 진폭특성이 유량계 검증 정밀도에 미치는 영향이 매우 크다는 것이 보고되고 있다^(3,4).

Table 1은 두 종류의 1", 2" 터빈미터와 2" 와 유량계, 3" 벌크미터에 대하여 펄스보간 오차 실험한 결과를 95% 신뢰도에서의 오차로 나타낸 것이다. 여기에서 신뢰구간을 구하기 위한 표준편차 σ 의 추정치 s 는 각 유량계에서 20회 이상이 실험측정치를 이용하여 계산한 것을 이용하였다. 이때의 측정치는 정규분포 모집단에서의 랜덤포본으로서 얻는 것이라고 생각한 것이다. 본 논문에서는 각 유량계 최대유량의 약 50%범위에 해당되는 주파수에서 펄스 실험한 결과만을 제시하였으나 다른 유량 범위에서도 오차범위는 Table 1의 결과에서 크게 벗어나지 않는다. 실험에 사용한 와유량계의 와류발생체 모양은 정삼각 기둥이었다.

Table 1의 펄스보간 오차 실험결과에 따르면 대체로 터빈 미터에서 발생하는 펄스의 주기변동 정도가 벌크미터나 와유량계 보다 작음을 알 수 있다. 이 결과는 Paton⁽²⁾의 실험결과와 컴퓨터 모의 실험을 통한 예측과 잘 일치하는 결과이다. 유량계 검증시스템에 관한 API의 석유류 측정교범 4장⁽⁶⁾에 의하면 유량계 검증시 최소 10000개 이상의 펄스를 수집함으로써 재래식 파이프 푸루버의 펄스 측정오차가 0.02%를 넘지 않도록 하고 있다. 그러나 소형 푸루버의 경우에는 수집하는 펄스의 수가 매우 작아 검증 대상 유량계로부터 발생하는 펄스 주기 변동폭이 무시할 수 없을 정도여서 재래식 푸루버와 똑같은 방법으로 유량계를 검증한다면

Table 1에서 볼 수 있듯이 ±0.02% 이내의 검증 정밀도 수준을 만족시킬 수 없다.

유량계에서 발생하는 펄스의 주기변동이 불규칙한 경우 같은 유량에서 푸루버의 피스톤 행정을 반복하면서 펄스 측정 실험을 되풀이 하여 실시하면 m 개의 서로 다른 실험 결과를 얻는다. 이와같이 하여 얻은 m 개의 측정값은 평균이 μ , 분산이 σ^2 인 무한 모집단에서 크기가 m 인 랜덤포본으로 생각할 수 있다. 이때 모집단은 정규 분포를 한다고 가정하였다. 따라서, m 개의 실험결과에서 얻은 평균값 \bar{X} 는 식(1)과 같이 평균이 μ , 분산이 σ^2/m 인 정규분포를 한다⁽¹⁰⁾.

$$Z = \frac{(\bar{X} - \mu)}{\frac{\sigma}{\sqrt{m}}} \tag{1}$$

여기에서 표본오차의 허용한계 $d = \bar{X} - \mu$ 를 포함하는 신뢰수준(significance level)이 $1 - \alpha$ 와 같이 되도록 표본의 크기 m 을 정하면 다음과 같다.

$$m = Z^2 \sigma^2 / d^2 \tag{2}$$

이때 Z 는 α 값에 따라 결정된다 식 (2)에서 변이계수⁽¹¹⁾ $C = \sigma/\mu$, $Cd = d/\mu$ 를 이용하여 표시하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m = Z^2 C^2 / Cd^2 \tag{3}$$

여기에서 $C = \sigma/\mu$ 의 추정치는 Table 1의 작성시 얻은 표본에서의 \bar{X} 와 s 를 이용하여 구하였다. 그리고 $Cd = 0.0002$ 로 하여 식 (3)에서 m 값을 구하였다 이때 벌크미터와 와유량계 그리고 터빈미터 (I)중 1"미터를 제외하고는 m 이 6에 가까운 값이거나 이보다 작은 값이라는 것을 알았다. 이와같은 결과를 근거로 하여 소형 푸루버로 현장에서 유량계를 검증할 때 같은 유량에서 6번이상 실험을 되풀이 하지 않는다는 가정 아래 $m=6$ 로 정하고 처음 6개 측정값만을 사용하여 펄스보간 정밀도 수준을 유량계 별로 결정하였다. 다음 Table 2는 위에서 기술한 대로 6개 측정치를 이용하여 $C = s/\bar{X}$ 를 구하고 자유도 5일때의 $t = 2.571$ 을 이용하여 95% 신뢰도에서의 오차한계를 공식 $\pm(2.571)C/\sqrt{6}$ 에 의해서 계산한 것이다.

Table 2에서 터빈미터(II)는 접속구경 1", 2"인 것 모두 $m=6$ 에서 ±0.02% 이내의 오차를 보이는데 반하여 제조업체가 다른 터빈미터(I)중 1" 미터는 ±0.05%로서 조금 큰 오차를 보인다. 이는 터빈미터에서 발생하는 펄스의 특성이 터빈미터 설계 및 제작정밀도에 따라 영향을 받음을 나타낸다.

Table 2 Pulse interpolation error of the 6 pass proving experiments

Flowmeter	Bore size	Uncertainty (%) when $m=6$
Turbine meter (I)	1"	± 0.05
	2"	± 0.02
Turbine meter (II)	1"	± 0.02
	2"	± 0.02
Bulk meter	3"	± 0.2
Vortex flowmeter	2"	± 0.2

와유량계의 경우는 오차가 $\pm 0.2\%$ 이내로써 제조업자가 제시한 오차 이내에서 소형 푸루버로 만족스러운 검증결과를 얻을 수 있음을 보여주고 있으나 벌크미터의 경우에는 기대했던 $\pm 0.02\%$ 이내의 오차에 훨씬 못미치는 결과를 보여주고 있다. 이는 벌크미터의 펄스발생 장치와 유량감지부 사이에 기어 트레인(gear train)이 있어 발생 펄스의 주파수 변동에 규칙성이 존재하기 때문인 것으로 설명할 수 있다. 따라서 소형푸루버로 벌크미터 등 기어트레인을 거치는 용적유량계(positive displacement flowmeter)를 직접 검증하는 것은 펄스 측정에 심각한 문제를 발생시킬 것으로 예상된다. 이때는 터빈미터와 같이 효과적으로 실험결과를 통계처리 할 수 있는 특성이 좋은 펄스를 발생시키는 미터를 기준 유량제로 선정하여 소형푸루버와 짝을 이루어

벌크미터의 현장교정에 이용하면 유량계 검증 정확도를 재래식 파이프 푸루버에 의한 검증 정확도 수준으로 향상시킬 수 있을 것으로 생각한다.

4.3 기본부피

Water draw에 의하여 피스톤 이동속도를 0.002 m/s~0.011m/s 범위에서 변화시키면서 결정된 푸루버의 기본부피는 Table 3과 같다. 소형 푸루버를 약 40일간 유량계 검증 실험에 사용한 후 재결정한 기본 부피값(water draw 2)과 비교한 결과 실험 초기값(water draw 1)보다 약 0.028% 감소하였는데 이 정도는 푸루버의 기본부피 결정에 대한 허용오차 이내이기 때문에 무시할 수 있다.

유량계를 실제 검증할때 최대 유량에서 측정 실린더내를 움직이는 피스톤의 속도는 water draw에 의한 기본부피 결정 실험때의 100배 이상이다. 따라서 펄스 보간오차 실험결과 펄스특성이 좋은 것으로 판명된 터빈미터를 마스터 미터로 하고 표준연구소 보유 중량식 액체 유량표준 시스템을 이용하여 유동율을 높여 피스톤 이동속도를 증가시키면서 푸루버의 기본부피를 측정한후 Fig. 3과 같이 피스톤 이동속도가 기본 부피에 미치는 영향을 조사하였다.

마스터미터 방법에 의하여 기본부피를 결정할 때 측정값의 재현도는 표준시스템의 유량계 실험정확도에 의하여 크게 영향을 받는다. 본 실험에서 사용한 중량식 시스템은 동적인 상태에서 중량을 측정하는 flying-start-and-finish 방법에 의하여 유량계를 실험 하도록 되어 있는데 검증 오차는 95%신

Table 3 Basic volume values determined by the water draw method

Exp No.	Water draw 1		Water draw 2	
	Piston velocity (m/s) $\times 10^{-3}$	Basic volume at 15°C, (L)	Piston velocity (m/s) $\times 10^{-3}$	Basic volume at 15°C, (L)
1	7.6	9.6841	8.3	9.6818
2	2.0	9.6841	9.0	9.6818
3	4.3	9.6841	8.6	9.6816
4	7.2	9.6841	7.7	9.6816
5	3.2	9.6843	7.7	9.6816
6	11.4	9.6843	7.1	9.6816
	Mean	9.6842	Mean	9.6817

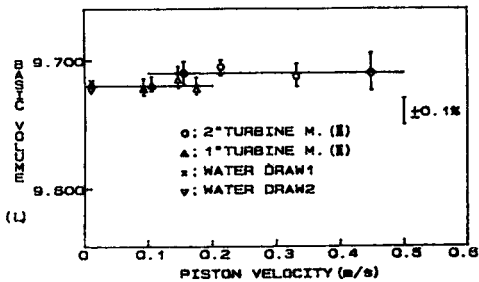


Fig. 3 Basic volume change of the KSRI prover as a function of the piston velocity

피도에서 $\pm 0.15\%$ 넘지 않는 것으로 밝혀진 바 있다⁽⁹⁾. 따라서 Fig. 3에 나타난 오차는 푸루버 기본부피 결정 과정에서 관여된 표준시스템의 오차와 푸루버의 펄스측정 오차를 포함한 값으로 한국표준연구소에서 제작한 소형 푸루버는 피스톤 속도 증가에 따른 기본부피 오차가 $\pm 0.05\%$ 를 넘지 않는 것으로 판단된다. 그러나 최대 유동율에서의 기본부피오차가 water draw 방법에 의한 실험결과와 같이 $\pm 0.02\%$ 이내의 오차한계를 만족시키는지의 여부는 정밀도 문제 때문에 마스터미터 방법으로는 알 수 없었다. 또한 Fig. 3에서 1\"터빈미터를 마스터미터로하여 측정된 기본부피값과 water draw에 의하여 낮은 피스톤 이동속도에서 결정한 기본부피값은 실험 오차범위 내에서 일치하는 반면 2\"터빈미터를 마스터미터로 하여 측정된 기본부피값은 약 0.05%의 편차를 보이는 이유는 피스톤의 이동속도 증가때문이기 보다는 두 터빈미터의 특성차이 때문으로 생각한다.

5. 결 론

기본부피가 약 9.68L인 이중 실린더형의 소형 푸루버를 제작하였다. 실험 유량계로 터빈미터, 벌크미터, 와유량계를 선정하여 소형 푸루버의 펄스 보간 오차와 피스톤 속도 변화에 따른 기본부피 변화 정도를 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 펄스 주기 변동폭이 불규칙적인 터빈미터를 사용하여 펄스 보간법에 의하여 펄스수를 측정할 때 실험결과에 통계적인 처리방법을 도입하면 95% 신뢰도에서 $\pm 0.02\%$ 오차이내로 펄스 보간오차를 유지할 수 있다.

(2) 펄스주기 변동폭에 규칙성이 있는 것으로 알려진 벌크미터는 소형 푸루버로 직접 검증하는 대신 펄스보간 오차가 적은 터빈미터를 기준기로 교정하는 것이 검증 정확도 유지에 유리하다.

(3) 마스터 미터 방법에 의하여 푸루버의 기본부피에 미치는 피스톤 속도 영향을 실험한 결과 그 크기가 0.05%이하였다.

(4) 한국표준연구소에서 제작한 소형 푸루버는 최고 $\pm 0.1\%$ 정확도로 유량계를 검증할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술처의 특정연구과제의 일부로 수행되었으며 과제 수행에 공동 참여해주신 한국 OVAL(주)의 정갑송 사장님께 감사드립니다. 또 연구과제 수행중 유량계 실험에 적극적으로 협조해 준 윤병로씨와 이생희씨 그리고 펄스 보간 결과의 통계처리 방법에 관하여 조언을 해주신 전 고려대학교 통계학과의 백운봉 교수께 감사드립니다.

參 考 文 獻

- (1) Groeneveld, G, and Jelffs, P.A.M, 1988, "Operation Experience with a Compact Prover-II", in Proceedings of North Sea Flow Metering Workshop 18-20 October 1988, NEL, Glasgow, U.K. Paper 5.2
- (2) Paton, R., 1988, "An Evaluation of the Brooks Instrument Compact Prover", Flow Measurement Memo DA1376, NEL, Glasgow, U.K.
- (3) Noble, T.M, and Heritage, J.R., 1986, "The Relationship between the Number of Passes and the Accuracy of a Compact Prover", in Proceedings of North Sea Flow Metering Workshop 7-9 October 1986, NEL, Glasgow, U.K.
- (4) Paton, R., 1987, "The Predictions of Flowmeter Calibration Repeatability Using Compact Provers and Pulse Interpolation", in Proceedings of Industrial Flow Measurement Onshore & Offshore, 22-23 September 1987, London, U.K.
- (5) Pursley, W.C., 1984, "Rebiew of Compact Provers", in Proceedings of North Sea Flow Metering Workshop 16-18 October 1984, NEL, Glasgow, U.K.
- (6) Hayward, A.T.J, 1979, "Flowmeters", The MacMillan Press Ltd, London, p9.
- (7) 1985, "Liquid Hydrocarbons-Pulse Interpolation", ISO/DP7278-3.

- (8) 1978, "Manual of Petroleum Measurement Standard, Chapter 4 Proving Systems", American Petroleum Institute.
- (9) Lim, K.W., Lee, K.B. and Paik, J.S., 1989, "Calibration of Coriolis Mass Flowmeters", in Proceedings of Fluids Engineering Seminar Korea-U.S. Progress, eds. Kim J.H, Hyun, J.M. and Lee, C.O., pp. 286~297, 3-8 September 1989, Taejon, Korea.
- (10) Box, G.E.P., Hunter, W.G. and Hunter, J.S., 1978 "Statistics for Experimenters", John Wiley and Sons Inc. New York, pp. 21~92.
- (11) Snedecor, G.W., and Cochran, W.C., 1980, "Statistical Methods, 7th edition", The Iowa State Press pp. 39~63.

●訂 正●

大韓機械學會論文集 第13卷 第6號(1989.11) 1174쪽의 우측 식(21)을 다음과 같이 바로 잡습니다.

誤	正
$\begin{Bmatrix} F_x(i, \phi) \\ F_y(i, \phi) \\ F_z(i, \phi) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\theta_i(\phi) & \sin\theta_i(\phi) & 0 \\ \sin\theta_i(\phi) & \cos\theta_i(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} F_x(i, \phi) \\ F_y(i, \phi) \\ F_z(i, \phi) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i(\phi) & -\sin\theta_i(\phi) & 0 \\ \sin\theta_i(\phi) & \cos\theta_i(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
$\begin{Bmatrix} F_T(i, \phi) \\ F_R(i, \phi) \\ F_A(i, \phi) \end{Bmatrix} \quad (21)$	$\begin{Bmatrix} F_R(i, \phi) \\ F_T(i, \phi) \\ F_A(i, \phi) \end{Bmatrix} \quad (21)$