

코리올리스 질량유량계의 유량측정에 영향을 미치는 인자에 관한 실험적 연구

임 기 원* · 이 완 규*

(2003년 4월 14일 접수, 2003년 10월 29일 심사완료)

An Experimental Study on the Influential Factors of Flow Measurement with Coriolis Mass Flowmeter

Ki Won Lim and Woan Kyu Lee

Key Words: Mass Flowrate(질량유동률), Coriolis Force(코리올리스 힘), Sensing Tube(감지관), Coriolis Mass Flowmeter(코리올리스 질량유량계), Gravimetric Flowmeter Calibrator(중량식 유량계 교정장치), Calibration(교정), High Pressure Gas Flow Measurement(고압 가스 측정)

Abstract

Coriolis mass flowmeter(CMF), which can measure the mass flow directly, is getting rapid attention for the industrial and custody transfer purpose. In order to study the characteristics and the applicability of CMF, it is tested with the national flow standard system. Two types of sensing tube, U-type and straight type, are employed in the test. Water, spindle oil and viscosity Standard Reference Material whose viscosities are 1, 20 and, $67 \text{ mm}^2/\text{s}$, respectively, are studied. It is shown that the linearity of CMF is getting deteriorated as the fluid viscosity increases, which is due to the zero drift and the relaxation time of the fluid. To test its applicability in the case of high pressured gas, it is calibrated using compressed air. It shows 1~1.6 % deviations compared to the calibration results using water. It concludes that the fluid velocity in CMF should be lower than the sonic velocity. In addition, the effects of the vibration from the pipeline and pump on CMF as well as the long term stability are studied.

기호설명

<p>a, b : 감지관 치수</p> <p>d : 감지관의 직경</p> <p>dr : 미소길이</p> <p>E : 영률(Young's modulus)</p> <p>F : 코리올리스 힘</p> <p>G : 전단계수(shear modulus)</p> <p>I : 단면 2차 모멘트</p> <p>J : 극단면 2차 모멘트</p>	<p>K_s : 감지관의 스프링 계수</p> <p>M_f : 유체의 단위 길이당 질량</p> <p>M_t : 감지관의 단위 길이 질량</p> <p>L : 감지관의 길이</p> <p>Q : 질량유량</p> <p>r : 회전축으로부터 거리</p> <p>s : 감지관의 회전축에서 거리</p> <p>S_a : 감지관의 단면적</p> <p>Δt : 감지관의 위상차</p> <p>U : 유체의 속도</p> <p>w : 감지관의 각속도</p> <p>x, y, z : 직교좌표계</p>
--	---

† 책임저자, 회원, 한국표준과학연구원 유체유동그룹
E-mail : kwlim@kriss.re.kr
TEL : (042)868-5314 FAX : (042)868-5028

* 한국표준과학연구원 강도평가그룹
E-mail : wklee@kriss.re.kr
TEL : (042)868-5250 FAX : (042)868-5635

그리스문자

- ϕ : 감지관의 각변위
 ρ : 유체의 밀도

1. 서론

부피측정유량계는 유체의 온도나 압력이 변하면 이에 따른 직접적인 보정을 해야 정확한 부피유량을 측정할 수 있다. 반면에 질량측정유량계는 온도와 압력에 의한 부피의 변화와 무관하게 질량 유량을 측정할 수 있는 장점이 있다.

질량유량계는 전자기유량계, 차압유량계에 이어 국내외 시장에서 세 번째 점유율을 보이고 있다. 특히 질량유량계는 장점과 활용의 범위가 확장됨에 따라 시장 점유율이 빠르게 증가하고 있고 차압유량계의 점유율을 능가 할 것으로 예상된다.

질량유량의 측정은 터빈유량계나 차압유량계 등 기존의 부피유량계를 이용하는 간접적인 방법으로 축방향 유동의 모멘텀을 이용하는 방법이 있고, 직접적인 방법으로 코리올리스(Coriolis)가속도, 열전달을 원리, 자이로(gyroscopic)의 원리를 응용하여 측정하는 방법이 있다.⁽¹⁾ 응용성과 정확도가 상대적으로 우수한 코리올리스 질량유량계(Coriolis mass flowmeter, CMF)와 열전달 질량유량계가 시장에서 유리한 경쟁력을 보이고 있다.

특히 CMF는 유량 및 밀도의 측정이 가능하여 다양한 분야에 응용되며 정확도가 향상됨에 따라 상거래용 유량계로 사용을 시도하고 있다. 또 다른 종류의 유량계로 측정이 어려운 부식성 액체 및 고점도 액체를 측정할 수 있는 장점이 있다.

코리올리스 가속도는 불란서의 수학자인 코리올리스에 의해 1835년에 규명되었다. 즉 회전하는 물체가 반지름 방향으로 속도를 가지면 코리올리스 가속도를 가지며 이동하는 물체는 코리올리스 힘을 받게 된다. 이 때 코리올리스 가속도에 의해 회전하는 물체가 받는 힘은 질량유동률과 관계가 있으므로 유량측정에 응용할 수 있다.

처음 이러한 원리를 유량측정에 응용한 것은 1953년 Li와 Lee⁽²⁾였으며 세계적으로 10여 개의 모델의 상품이 시장에서 경쟁하고 있다. 일반적으로 CMF는 감지관(sensing tube)을 가진하면서 회전운동을 발생시키고 감지관 내부를 유체가 유동하게 된다. 이상적인 CMF는 측정원리로부터

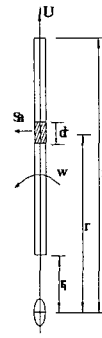


Fig. 1 Production of Coriolis acceleration

감지관 재료의 역학적 특성이나 유체의 물리적 성질에 영향을 받지 않아야 한다. 그러나 온도, 압력, 점도의 변화에 따라 유량계의 특성에 영향을 미치고 있음이 보고되고 있다.⁽³⁾ 또 감지관의 재료도 온도와 압력의 영향으로 기계적인 성질이 변하고 이에 따라 진동이 영향을 받고 결국 유량계 측정값이 변한다.

본 연구에서는 이러한 CMF의 측정 특성을 고려하여 교정방법, 유체의 점도, 와류(swirl) 및 관로의 진동이 측정 특성에 미치는 영향과 고압가스 측정의 응용에 대해 고찰하였다.

2. 유량 측정원리와 특성

Fig. 1과 같이 각속도 w 로 회전하는 관로 내부에 회전하는 방향과 직각인 반지를 방향으로 유체가 속도 U 로 움직이면 유체는 코리올리스 가속도를 가지게 된다. 유체의 질량 $\rho S_0 dr$ 에 작용하는 코리올리스 힘은 U 의 방향에 따라 파이프의 회전운동 w 를 가속하거나 감속하게 한다.

즉 그림과 같이 유체가 회전축으로부터 멀어지는 방향으로 유동하면 관로의 회전운동과 반대방향으로 코리올리스 힘이 작용하고, 유체가 회전축의 중심 방향으로 유동하면 관로의 회전방향과 같은 방향으로 작용하며 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$F = -2Uw\rho S_0 dr \quad (1)$$

즉 유체에 작용하는 코리올리스 힘은 회전운동과 같은 방향 또는 반대방향으로 작용하며 힘의 크기는 유체의 질량유량에 비례하게 된다. 즉 같은 유량이 회전축 방향과 반대 방향으로 흐를 때 코리올리스 힘에 의해 감지관 운동은 시간차를 가지게 된다. 따라서 회전운동에 영향을 미치는 정도 즉 시간차를 측정하여 질량유량을 측정하게 된다.

감지관 운동의 시간차는 감지기에 의해 위상의 차로 측정되며 이 때의 질량유량과 위상차와 관계는 식 (2)와 같이 표현된다.⁽⁴⁾

$$Q = \frac{K_s \Delta t}{2d^2} \quad (2)$$

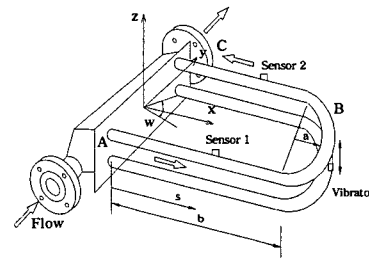
실제 유량계의 제작에 있어서 관로를 회전하는 방법은 기술적으로 어려우므로 감지관을 진동시키고 관로 내부로 유체를 유동시켜 코리올리스 힘을 발생시킨다. 이러한 감지관과 진동의 형태는 다양하며 제작회사 마다 다르다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 U자형(U-shaped)과 직관형(straight) 감지관을 가진 CMF를 선택하여 실험하였다.

Fig. 2(a)에서 유체는 유량계 내부의 감지관에서 A->B->C로 유동한다. U자형 감지관에 가진기와 감지기 2개가 부착되어 있다. 가진기는 측정관이 가지는 고유진동수로 가진하도록 설계하고 감지기는 코리올리스 힘에 의한 감지관 운동의 위상차를 측정하게 된다.

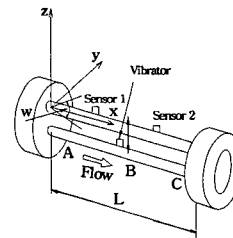
Fig. 2(b)의 직관형 감지관의 경우는 가진기가 감지관의 중간에 위치하여 유체가 A->B->C 방향으로 유동하여 같은 방법으로 감지기 1, 2에서 위상차를 측정하게 된다.

Fig. 3에서 유체의 유동이 없을 때는 점선과 같이 감지기 1, 2의 위상의 차이가 없으나 유체가 유동하면 식 (1)의 코리올리스 힘에 의해 그림과 같이 Δt 만큼 위상(phase)의 차이가 발생한다. 즉 유동이 회전축 중심에서 멀어지는 A->B에서는 코리올리스 힘과 운동방향에 반대로 작용하므로 위상이 느려지고 B->C의 유동에서는 유체가 회전축 중심 방향으로 유동하여 운동방향과 같은 방향으로 작용하여 위상이 빨라지게 된다.

일반적으로 상업용 유량계의 위상의 차이는 수십 μs 이하이고, 감지관의 최대 변위는 끝에서 1 mm 이하이다.⁽⁵⁾



(a) U-type



(b) Straight type

Fig. 2 Design of sensing tube

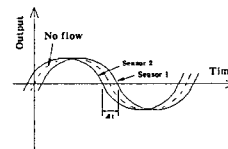


Fig. 3 Phase difference of sensing tube

상업용 CMF의 초기모델은 감지관이 1개인 경우도 있었으나 현재는 대부분 2개이다. 이는 외부의 진동의 영향을 줄이기 위한 방법으로 상대적인 변위를 측정하고 효과적인 가진을 위한 설계이다.

실험에 사용된 CMF의 가진주파수는 U자형이 약 100 Hz, 직관형이 약 1 kHz로서 관로의 진동

으로부터 영향이 적도록 한 것이다. 외부에서 가진주파수와 비슷한 주파수를 가진 진동이 작용하면 맥놀이에 의한 간섭을 받게 된다. 이는 감지관의 진동에 교란으로 작용하여 측정에서는 반복성을 나쁘게하고 오차를 유발하게 된다. 관로에서 유체유발 진동(flow induced vibration)은 수십 Hz 미만이므로 가진주파수와 차이를 두어 맥놀이를 방지하도록 설계한다.

실험에 사용된 Fig. 2(a)의 U자형 감지관의 운동방정식은 식 (3)과 같다.⁽⁵⁾

$$EI \frac{\partial^4 z}{\partial s^4} - \frac{GJ}{a^2} \frac{\partial^2 z}{\partial s^2} - \frac{EI+GJ}{a} \frac{\partial^2 \phi}{\partial s^2} + M_f \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + M_f \left(\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + 2U \frac{\partial^2 z}{\partial s \partial t} + U^2 \frac{\partial^2 z}{\partial s^2} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial s^2} - \frac{EI}{a^2 GJ} \phi + \frac{1}{a} \left(1 + \frac{EI}{GJ} \right) \frac{\partial^2 z}{\partial s^2} = 0$$

그리고 운동방정식 식 (3)의 경계조건은 식 (4)와 같다.

$$z(s, t) = 0, \quad \frac{d}{ds} z(s, t) = 0$$

$$\phi(s, t) = 0, \quad \frac{d}{ds} \phi(s, t) = 0 \quad (4)$$

at $s=0, s=\pi a + 2b$

또 Fig. 2(b)의 직관형 감지관의 운동방정식은 식 (5)과 같다.⁽³⁾

$$EI \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + (M_f + M_t) \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + 2M_f U \frac{\partial^2 z}{\partial t \partial x} + M_f U^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0 \quad (5)$$

운동방정식 식 (5)의 경계 조건은 식 (6)과 같다.

$$z(x, t) = 0, \quad \frac{d}{dx} z(x, t) = 0 \quad (6)$$

at $x=0, x=L$

감지관의 진동은 경계 조건에 따라 진동의 특성이 정해지므로 CMF의 제작에는 감지관의 고정에 기술적인 노하우가 요구된다. 감지관은 몸체에 용접하며 진동하는 동안 용접 부위에 응력이 집중되어 감지관의 물리적 특성이 변하기 쉽다.

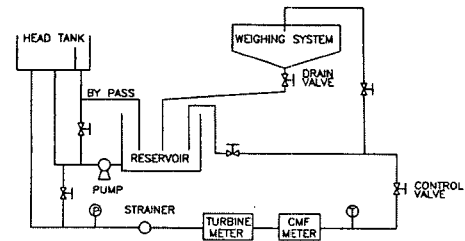


Fig. 4 Primary liquid flow standard system

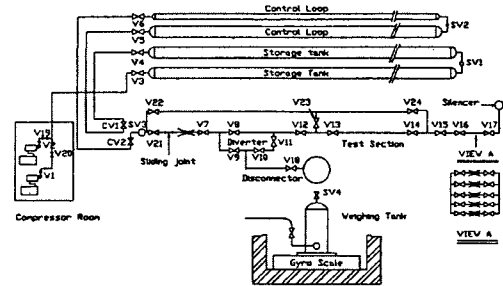


Fig. 5 High pressure gas flow standard system

응력 집중에 의해 재질의 특성이 변하거나 용접부의 변형으로 경계조건이 변하면 진동의 특성이 변하고 유량계는 측정값이 변하게 된다. 상업용 유량계는 장착후 최소 1년의 교정주기나 또는 수년간 사용할 수 있어야 하므로 상업용 CMF는 감지관의 용접부에 응력집중이 발생하지 않도록 설계하고 있다.

3. 실험 및 장치

CMF의 신호 특성과 응용 범위의 실험은 교정 방법에 따른 CMF의 특성과 측정값의 장기 안정성, 유체의 물성에 따른 특성의 변화 및 고압가스 측정의 응용에 관해 실험하였다.

실험에 사용된 유량표준장치는 증량식 측정방식⁽⁶⁾을 선택하였으며 액체의 경우는 Fig. 4의 장치를 사용하였다. 저장조의 유체는 펌프에 의해 일정수두유지장치(constant head tank)로 유동하고 따라서 시험관로의 유동물은 안정되게 유지된다. 유체는 CMF가 설치된 시험관로를 지나 증량측정장치(weighing system)에 수집되어 증량을 측정하여 CMF의 측정값과 비교하게 된다. 실험은 standing start and finish(S. S. & F.)방법과 flying start and finish(F. S. & F.)방법으로 실험하였다.

교정장치의 측정불확도는 ISO에서 권고하는 방법에 따라 평가하였으며 불확도는 $\pm 0.1\%$ 이내 이었다.^(7,8)

고압가스 측정 실험은 Fig. 5의 교정장치를 사용하였다. 실험장치는 압축공기를 발생시키는 압축기와 파이프형 저장탱크, 기준유량계로 소닉노즐을 사용하며 중량측정장치 및 유동전환장치로 구성되어 있다. 측정의 원리는 질식(choke)상태에서 소닉 노즐을 통과한 유체의 중량을 측정하여 소닉 노즐의 유출계수를 구한 다음 소닉 노즐과 CMF의 측정값과 비교하였다. 고압가스 교정장치도 ISO에 따라 평가했으며 불확도는 $\pm 0.1\%$ 이내이었다.⁽⁹⁾

장기 안정성 실험에 사용된 CMF는 U자형 감지관이고 접속구경이 150 mm(D150)으로 최대유동률은 20 kg/s이며 생산자가 주장하는 정확도는 $\pm 0.4\%$ 이고 작동유체는 물로 실험하였다.

유체물성 영향 실험은 U자형 감지관을 가진 CMF로 접속구경이 25 mm(D25)이고 최대유동률은 1 kg/s이고 정확도는 $\pm 0.4\%$ 이었다. 작동유체는 20℃에서 점도가 1 mm²/s인 물, 밀도가 880 kg/m³이고 점도가 20 mm²/s인 스피들 오일과 밀도가 860 kg/m³이고 점도가 67 mm²/s인 점도 표준액(standard reference material, SRM)을 사용하였다.

직관형 CMF는 접속구경이 25 mm(D25)이고 최대유동률은 5 kg/s로서 정확도는 $\pm 0.5\%$ 이다. 물과 스피들 오일로 실험하였으며 물 실험에서는 와류의 영향을 실험하였다. 일반적으로 유량계의 교정은 발달한 속도분포를 가질 때 측정값이 기준이 되므로 유량계 상류에 직관부를 설치하여 발달한 속도 분포를 얻는다. 그런데 유량계 상류의 배관 형상에 따라 속도 분포의 찌그러짐 또는 회전유동이 발생할 수 있으므로 이의 영향을 고찰 할 필요가 있다. CMF의 상류에 Fig. 6과 같은 와류 발생기를 설치하고 회전유동의 영향을 실험하였다.

고압가스 측정용 실험에서는 U자형 감지관을 가진 CMF 2개로서 접속구경이 각각 40 mm (D40), 25 mm(D25)이며 최대유동률은 각각 3, 1 kg/s인 유량계를 사용하였다.

한편 진동영향의 실험에서는 펌프로부터 발생

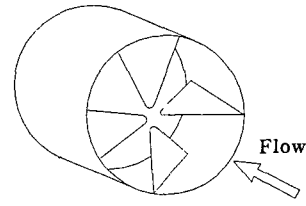
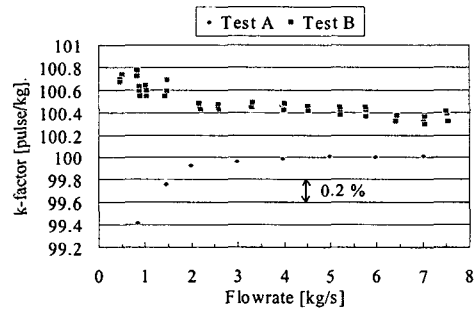
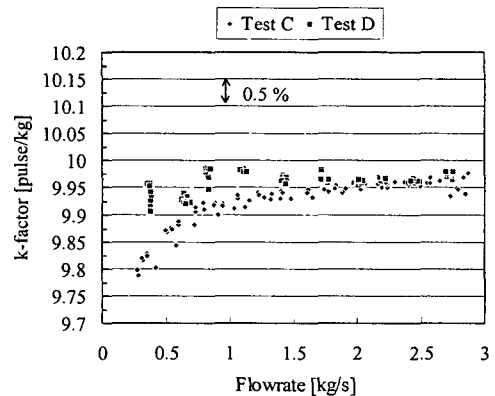


Fig. 6 Swirl generator



(a) U-shaped sensing tube (D150)



(b) Straight type sensing tube(D25)

Fig. 7 Long term stability of CMF

하는 기계적인 진동과 유체의 맥동이 CMF의 측정특성에 미치는 영향을 실험하였다. 따라서 펌프와 CMF 사이에 진동 절연을 위한 플렉시블 조인트 없이 접속구경 25 mm(D25)인 U자형 CMF를 설치하고 진동의 영향을 고찰하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

유체 물성, 와류, 외부 진동의 영향 및 고압가스 측정 응용이 CMF의 측정에 미치는 영향을 실험하기 위해 우선 생산자가 주장하는 성능을 확인 할 필요가 있다. 유량표준장치를 이용하여 평가하였으며 CMF의 성능에 영향을 미치는 각종 인자의 실험 이전에 CMF 특성의 안정성과 성능의 변화를 확인하기 위한 목적이었다.

유량계 특성평가를 위한 실험은 단위 유동 질량당 유량신호의 출력 펄스를 나타내는 k 팩터가 유동률의 변화에 따라 변하는 정도를 고찰하였다.

Fig. 7(a)는 U자형 CMF(D150)의 장기안정성을 실험 결과로서 실험 A와 B는 약 1년의 시간차이가 있다. 유동률 0.5-8 kg/s 범위에서 실험하였고 약 0.4 %의 차이를 보이고 있다. 특히 유동률이 2 kg/s 보다 작아지는 경우는 k팩터가 서로 반대 방향으로 편차를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 감지관 탄성의 변화등에 기인하는 경년 변화로 판단된다. 생산자가 주장하는 측정정확도가 ±0.4 %이므로 1년의 시간 차이에도 원래의 정확도를 유지하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7(b)는 직관형 CMF(D25)로서 측정범위는 0.2-3 kg/s로서 실험 D 이후 약 1년후 측정된 결과가 실험 C이다. 유동률 0.5 kg/s 이하를 제외하고 생산자가 주장하는 정확도 ±0.5 % 이내임을 알 수 있다. 직관형 감지관은 낮은 유동률에서 같은 방향의 편차를 보이고 1년후 실험의 결과(실험 C)의 k 팩터가 더 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 7(a), (b)의 실험중간에 영향 인자를 실험 하였으므로 CMF는 일반적인 사용환경과 비슷한 조건이 유지되었다고 할 수 있다. 또 낮은 유동률에서 편차가 커지거나 방향이 달라지는 것은 유체의 유동으로부터 유량신호로 변환하는 과정에서 변환신호가 상대적으로 작기 때문 나타날 수 있는 현상이다.

따라서 CMF는 약 1년 동안 원래의 성능이 유지되었다고 볼 수 있으며 영향 인자의 실험에서 나타난 측정 결과는 영향 인자에 의한 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 8은 U자형 CMF(D25)로 물과 다른 유체를 측정된 결과이다. 점도표준액과 스피들유의 경우

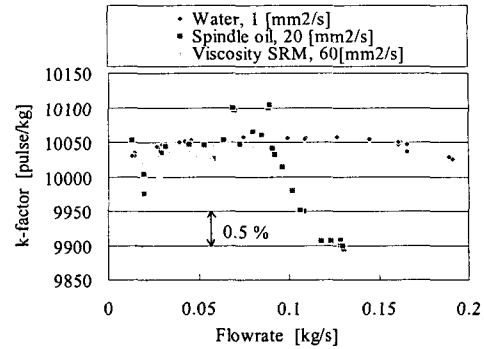


Fig. 8 Viscosity effects on a CMF with U-shaped sensing tube(D25)

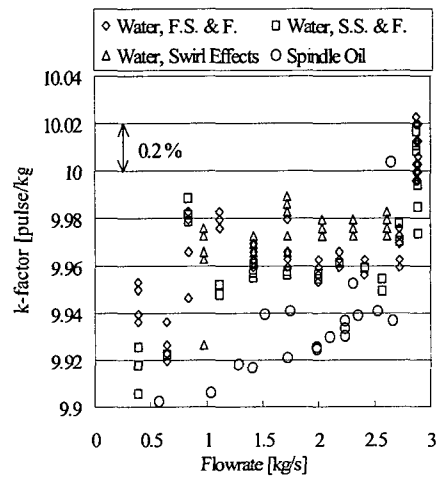


Fig. 9 Swirl and viscosity effects on a Coriolis flowmeter with straight sensing tube(D25)

는 점도가 높아져 교정장치의 유동률 발생에 제약이 되어 측정 가능한 범위가 줄어들었다.

물 측정의 결과는 실험한 유동률 범위에서 측정성능이 유지되고 있음을 알 수 있다. 스피들유는 낮은 유동률에서 반복성이 나빠졌으나 정확도 범위 이내의 결과를 보이거나 유동률 0.1 kg/s 이상에서는 선형성이 급격히 나빠져 최대 1.5 %의 편차를 보이고 있음을 알 수 있다. 점도 표준액의 경우는 정확도 이내지만 물 보다 k 팩터가 0.2 % 작은 것을 알 수 있다. 유동률을 증가시켜 실험하면 스피들유 같이 k 팩터값이 작아지는 쪽으로

편차를 가질 것으로 예상되나 높은 점도로 인하여 유동률 발생에 한계가 있었다.

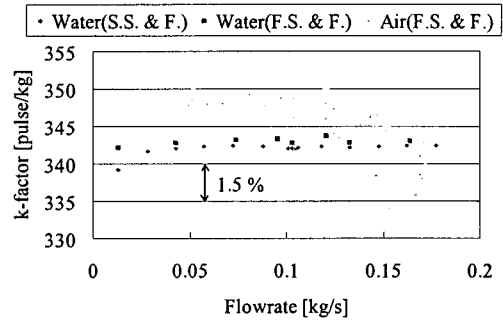
한편 Fig. 9는 점도와 와류가 직관형 CMF(D25)에 미치는 영향을 실험한 결과로서 물의 경우는 F. S. & F.방법과 S. S. & F.방법을 사용하였다. 상업용 유량계는 보통 1 초 정도의 응답속도를 가지는데 2가지의 교정방법은 CMF의 응답속도가 측정값에 미치는 영향을 확인하기 위한 것이다.

즉 F. S. & F.방법은 정상상태의 유동에서 유량을 측정하므로 응답속도가 영향을 미치지 않으나 S. S. & F. 방법은 유동이 정지된 상태에서 교정을 시작하므로 정상상태로 변화하는 과정의 영향을 고찰 한 것이다. 실험의 결과에서 알 수 있듯이 교정방법이 특성에 미치는 영향이 없음을 알 수 있고 직관형 CMF의 특성곡선은 유동률 3 kg/s에서는 k 팩터 값이 커지고 0.4 kg/s에서는 작아졌다. 스펀들유의 측정결과는 물보다 0.25 % 정도 k 팩터가 작아지는 것을 알 수 있고 이는 Fig. 8의 U자형 CMF에서와 같이 점도가 높아질수록 일반적으로 k 팩터가 작아지는 경향을 보이고 있다.

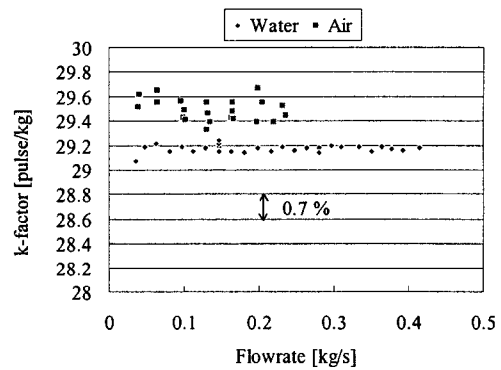
점도가 증가 할수록 선형성이 나빠지고 k 팩터 값이 작아지는 것은 영점 변화(zero drift)와 유체의 완화 시간(relaxation time)에 의한 것으로 설명될 수 있다.⁽³⁾ 즉 측정관 내부에 고점도 액체가 빠른 속도로 유동하면 관로의 강성을 증가시키고 유체 점성은 진동운동을 방해하는 효과를 가져온다. 따라서 코리올리스 힘에 의한 감지관의 변위가 같은 질량유동률에서 물 보다 상대적으로 작아지고 또 불규칙해지기 때문이다.

그리고 높은 점도를 측정하는 경우 k 팩터 값은 작아지나 원래의 성능을 어느 정도 유지하고 있다. 그러나 특정한 유동률 이상에서는 선형성이 나빠져 일정한 정확도로 측정할 수 없으므로 측정 가능한 유량범위가 줄어든다.

한편 와류의 영향은 실험 유동률 범위에서 0.2 % 정도 k 팩터값이 크나 정확도를 고려하면 의미 있는 변화는 아니라고 판단된다. CMF의 상류에 Fig. 6의 와 발생기를 삽입하여 와유동을 발생하였으나 영향을 미치지 않음을 뜻한다. 이는 CMF는 접속구경보다 작은 2개의 감지관으로 나누어 유동하므로 발생된 와류가 감지관까지 유지되지 않거나 관로 내부의 속도 분포나 와류의 분포에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.



(a) U-type sensing tube (D25)



(b) U-type sensing tube (D40)

Fig. 10 Calibration with high pressure air

즉 CMF의 설치시 발달한 속도 분포를 얻기 위한 유량계 상류의 직관부가 필요 없음을 알 수 있다.

Fig. 10(a), (b)는 U자형 CMF의 D25, D40으로 물과 압축 공기의 측정 결과를 각각 나타낸 것이다. CMF는 이론적으로 유체가 액체 또는 기체 이거나 질량유량에 비례하는 유량신호를 출력하게 된다. 그런데 압축성 유체인 공기는 물과 같은 질량유동률을 발생시키기 위해서는 높은 압력이 필요하고 이는 감지관의 재질의 기계적인 특성에 영향을 미친다.

물 측정의 결과는 반복성 $\pm 0.4\%$ 이내이고 낮은 유동률의 1점을 제외하면 20:1의 측정범위에서 $\pm 0.4\%$ 의 선형도를 보이고 있다. 즉 물 측정실험에서는 CMF의 작동이 정상적인 임을 확인할 수 있다.

한편 공기측정실험에서는 유동률 0.12 kg/s가

지 반복성과 선형성이 $\pm 0.4\%$ 를 보이고 있으며 k 팩터가 물 측정결과보다 1.6% 크게 나타났다. 이 보다 유동률이 증가하면 반복성과 선형성이 각각 $\pm 1.5\%$, $\pm 2.5\%$ 증가하여 측정범위에 제약이 되는 것을 알 수 있다.

이는 유동률 0.12 kg/s 에서 CMF 전후의 차압이 9 kgf/cm² 으로서 유동이 음속에 도달하여 충격파가 발생하고 유동이 변하는 불안정한 상태가 되어 반복성과 선형성이 나빠지는 것으로 판단된다.

한편 Fig. 10(b)의 U자형 D40의 CMF를 물과 압축공기를 측정된 결과이다. 물은 유동률 0.4 kg/s까지 반복성과 선형성이 $\pm 0.2\%$ 로 원래의 성능이 유지된다고 볼 수 있다. 압축공기의 측정은 실험장치의 제약으로 0.25 kg/s까지 실험했으며 반복성과 선형성이 $\pm 0.4\%$ 로서 물 실험 결과보다 나빠지는 것을 알 수 있으며 물보다 k 팩터 값이 1% 높게 나타났다. D40의 측정에서는 D25와 같이 특정한 유동률에서 선형성과 반복성이 급격히 나빠지는 나타나는 현상이 나타나지 않았다. 즉 최대 유동률 0.25 kg/s 에서 유속이 음속에 도달하지 않았기 때문 선형성이 유지된다고 볼 수 있다.

압축공기의 측정은 물보다 k 팩터 값이 1~1.6% 크게 나타났고 반복성은 2배로 커지고 선형성은 유동이 음속 근처에서 크게 나빠졌다. 반복성과 선형성은 충격파에 의한 유동의 불안정성에 1차적으로 기인하지만 압력이 높아짐에 따라 감지관의 강성(stiffness)계수와 이에 따르는 불균형이 복합적으로 나타난 것으로 생각된다. 따라서 CMF의 압축공기 측정에서는 물 측정 값보다 k 팩터가 크게 나타나고 측정범위도 음속보다 작은 범위에서 측정이 가능한 것을 알 수 있다.

한편 고점도 액체(스핀들유, 점도표준액)와 공기 측정 결과와 비교하면 고점도 액체는 물보다 k 팩터가 작고 압축 공기의 경우 물보다 크게 나타났다. 즉 k 팩터 값이 유체의 점성이 커지면 작아지고 점성이 작아지면 커지는 일정한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

CMF는 감지관의 진동으로부터 질량유량을 측정하는 원리이므로 감지관의 진동이 교란되면 곧 측정값의 반복성과 선형성이 나빠게 된다.

CMF가 설치되는 관로는 기계적인 진동과 펌프에서 발생한 맥동의 영향을 받게 된다. 사용자

Table 1 Frequency spectrum of pipe line vibration (acceleration)

Direction Hz(dB)	Flow	Vertical	Horizontal
26			-37
30	-38	-20	-16
48.5		-39	-27
60	-37	-27	-28
77.5			-36
89	-31	-37	-32
119		-38	
180	-35		

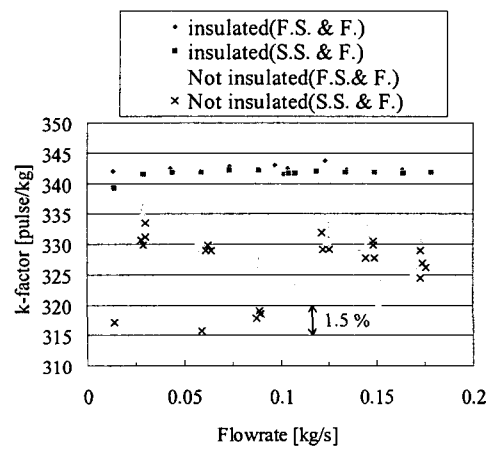


Fig. 11 The effects of external vibration from pump on a U-shaped sensing tube(D25)

는 이러한 영향을 피하기 위해 절연 장치를 부착해서 사용해야 한다.

진동 영향을 실험하기 위해 원심 펌프로 유동을 발생하는 실험장치에서 진동절연장치(flexible joint)를 제거한 다음 펌프로부터 약 2 m 거리에 CMF를 설치하고 진동 가속도를 측정하였다. 관로의 진동은 CMF의 외부에 진동센서를 부착하고 유동방향(Fig. 1(a)의 y 방향), 수직방향(Fig. 1(a)의 x 방향), 수평방향(Fig. 1(a)의 z 방향)의 주파수 스펙트럼의 최고값(peak value)의 상대적인 크기를 측정하였다. 측정은 신호분석기(signal analyzer, HP3526A)를 사용하였으며 측정 결과는 Table 1에 나타났다.

주파수는 유동방향은 89 Hz, 수직방향과 수평방향은 30 Hz가 지배적이고 방향은 수평방향의

가장 큰 것을 알 수 있다. 또 감지관의 가진 주파수인 100 Hz 근처는 작은 반면 30 Hz가 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 F. S. & F.와 S. S. & F.방법으로 각각 U자형 CMF(D25)를 외부진동의 영향 실험의 결과이다. 절연된 상태에서 실험 범위인 유동률 0.18 kg/s까지 ± 0.4 %의 반복성과 선형성을 보이고 있다. 절연장치가 제거된 상태에서 반복성이 ± 3 %로 나빠지고 최고 7 % 정도 k 팩터 값이 작았다.

CMF는 진동의 영향을 줄이기 위해 감지관을 2개로 설계하지만 실험의 결과와 같이 직접적으로 진동의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 본 실험의 결과는 진동이 미치는 영향을 포괄적으로 보여주고 있으며 기계적 진동과 유체 맥동의 영향이 복합된 결과로 생각된다. 따라서 CMF의 설치에는 펌프로부터 발생하는 기계적인 진동과 펌프의 맥동을 완화하기 위한 배관이 필요함을 알 수 있다.

5. 결론

상업용 코리올리스 질량유량계(CMF)의 측정신호의 안정성, 유체물성 및 와류의 영향, 고압가스 측정 응용 및 펌프로 발생하는 진동의 영향을 실험하였다. 중량식 유량표준장치를 이용하였고 실험의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험에 사용된 U자형과 직관형 CMF의 안정성 실험에서 최대 0.4 %의 편차(U자형)를 보이고 생산자가 주장하는 정확도 이내로 안정되었다.

(2) 유체물성 영향의 실험에서는 U자 CMF(D25)는 반복성이 ± 0.5 %이고 특정 유동률 이상에서는 k 팩터가 최대 1.5 % 작아져 선형성이 나빠지고 직관형 CMF(D25)는 점도가 높아짐에 따라 k 팩터 값이 0.5 % 작았다.

(3) 압축공기 측정응용에서는 물보다 k 팩터값이 1~1.6 %크게 나타났고 유동이 음속이하에서만 선형성이 유지되었고 음속이 사용의 한계이었다. 또 고점도 액체의 실험과 비교하여 점도가 작으면 k 팩터가 크고 점도가 크면 k 팩터가 작아지

는 일관된 경향을 보였다.

(4) CMF는 와류의 영향을 받지 않았고 관로에 설치시 직관부가 필요 없음을 알았다.

(5) 펌프로 발생하는 기계적인 진동과 맥동이 직접적인 영향을 미쳐 반복성이 ± 3 %로 커지고 CMF는 설치시 진동과 맥동을 완화시키는 장치가 필요하다.

참고문헌

- (1) Brain, T. J. S., 1969, "The True Mass Flowmeter," Flow Measurement Memo No. 26, Flow Measurement Division, NEL, Scotland.
- (2) Li, Y. T. and Lee, S. Y., 1953, "A Fast Response True Mass Rate Flowmeter," *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs*, Vol. 75, pp835-841.
- (3) Keita, N. M., 1989, "Contribution to the understanding of Zero Shift Effects in Coriolis Mass Flowmeters," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 1, No. 1, pp 39-43, 1989
- (4) Furness, R., 1989, "The Application, Standardisation and Future Use of Coriolis Type Mass Meters in the Oil and Process Industries," *Proc. International Conf. on Mass Flow Measurement*, London.
- (5) Sultan, G. and Hemp, J., 1989, "Modelling of the Coriolis Mass Flowmeter," *J. of Sound and Vibration*, Vol. 132, No. 2, pp473-489.
- (6) ISO 4185, 1983, Measurement of Liquid Flow in closed conduits - Weighing Method.
- (7) Lim, K. W., 2001, "A Study on the Measurement Uncertainty of Flowmeter Calibrator," *J. of KSME (B)*, Vol.25, No.4, pp. P561~571.
- (8) Lim, K. W., 2002, "Calibration Procedure of Spindle Oil Flow Standard System," DOC. No. C-10-3-0101-2002(E), KRISS.
- (9) Park, K. A. and Lee, S. H., 2002, "Calibration Procedure of High Pressure Gas Flow Standard System-Critical Flow Nozzle, DOC. No.C-10-4-0100-2002(E), KRISS.