

< 논문 >

소형 코리올리 질량 유량계의 개발

임기원[†] · 지정근^{*}

(2005년 11월 8일 접수, 2006년 4월 29일 심사완료)

Development of Small Size Coriolis Mass Flowmeter

Ki Won Lim and Ji, Jueng-Keun

Key Words : Coriolis Mass Flowmeter(코리올리 질량 유량계), Mass Flow(질량 유량), Flow Measurement(유량 측정), Flow Standard(유량표준), Uncertainty(불확도), Calibration(교정), Gravimetric Method(중량측정법)

Abstract

A Coriolis mass flowmeter(CMF), which has U-Shaped unique measuring tube was developed for direct mass flow measurement. In order to convert the time difference between two measuring tubes motion into mass flowrate and flow quantity, a signal processing circuit, as a part of CMF, was also developed. The CMF was designed as the 15 mm nominal diameter of pipe connection and the 8 mm stainless steel(sus 316) pipe was used for measuring tube. To maximize the flow signal(time difference) from the measuring tubes, the natural frequency of measuring tube was adjusted as 220 Hz, which is same as the frequency of exciter. The maximum displacement at the end of the measuring tube was measured as 0.05 mm, and the maximum time difference between two measuring tubes was observed as 20 μ s, which was proper for discrimination and measuring range of CMF. The developed CMF was tested against the gravimetric flowmeter calibrator in the range of 3 kg/min and 30 kg/min. The results showed that the CMF has good linearity and repeatability in the tested flow range. Large size of CMF base on the current study experience will be developed.

기호설명

A	: 측정관의 단면적 [m^2]	L	: 측정관의 길이 [m]
B	: 자속의 세기 [Gs]	m	: 점(유체) 질량 [kg]
C_1, C_2	: 보정 상수	M_T	: 측정관의 질량 [kg]
d	: 측정관의 폭 [m]	q_m	: 질량 유량 [kg/m^3]
f	: 측정관의 진동수	t	: 시간 [s]
F	: 가진력 [N]	T	: 토오크 [N·m]
F_c	: 코리올리 힘 [N]	T_t	: 측정관의 진동 주기
i	: 전류 [A]	v	: 코일의 선속도 [m/s]
I_s	: 측정관의 관성 모멘트 [m^4]	V	: 유체 속도 [m/s]
k	: 상수	V_p	: 측정관의 부피 [m^3]
k_s	: 측정관의 탄성계수 [N/m]	V_{sig}	: 감지센서 코일의 기전력 [V]
ℓ	: 코일 스프링의 길이 [mm]	w	: 원 진동수 [rad/s]
		w_s	: 고유진동수
		x, y, z	: 직교 좌표계
		Ω	: 각속도 [rad/s]
		θ, θ_0	: 비틀림 각, 최대 비틀림 각 [rad]

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

* (주)하이트롤 기술연구소

ρ : 유체 밀도 [kg/m^3]
 τ : 측정관 운동의 시간차 [s]

1. 서론

코리올리 질량유량계(Coriolis mass flowmeter: CMF)는 질량 유량을 직접 측정할 수 있으므로 부피유량을 측정하는 유량계에 비해 상대적으로 장점이 많다. 부피유량은 온도와 압력에 따라 측정값이 변하기 때문에 별도로 측정하여 보정을 해야 하며, 이 때 온도와 압력 측정의 불확도에 따라 유량 측정의 측정 불확도도 증가하게 된다. 또 간접적인 방법으로 질량 유량을 측정할 때는 유체밀도와 부피유량을 측정한 후 연산기를 이용하여 질량 유량을 계산한다.

CMF는 질량 유량을 직접 측정할 수 있는 장점 이외에 부피 측정 유량계에 비해 상대적으로 정확도가 높으며 측정 범위도 넓다. 제한된 압력과 온도 범위에서 액체, 기체 등 모든 유체를 측정할 수 있으며 측정원리상 유체의 점도나 밀도의 변화에 영향을 받지 않는다. 또 측정관을 유동하는 유체의 밀도를 직접 측정할 수 있으므로 다른 종류의 유량계와 비교하여 활용범위가 넓어서 기술적인 경쟁력이 우위에 있다고 할 수 있다. 그리고 마모 등의 문제를 발생시키는 기계적인 가동부가 없기 때문에 유지 보수성이 우수하다.

CMF의 최초 모델⁽¹⁾은 1950년 실험실에서 시도되었으며 실용화 모델은 1974년 J. E. Smith에 의해 개발되었다. 1980년 이후 다양한 형태의 질량 유량계가 개발되어 시장에서 경쟁하고 있으며, Fig. 1은 시장에 출시된 CMF의 측정관(measuring tube)의 형태를 나타낸 것이다.⁽²⁾

초기의 모델은 Fig. 1의 (b) 같은 U자형의 측정관이 하나인 것이 개발되었으나 현재는 외부의 진동에 강한 2개의 측정관을 가진 모델이 일반화되었다. 측정관이 하나인 경우는 영구자석과 감지코일(sensing coil)이 케이싱(casing)과 측정관에 각각 부착되어 있으므로 외부의 진동으로부터 직접 영향을 받는다.

측정관이 하나인 것은 Fig. 1에서 (d), (g), (j)이다. (d), (g)가 외부의 진동에 강하며 상대적으로 큰 유량 신호를 얻을 수 있으나 구조적으로 복잡한 점이 있고, (j)는 구조적으로 간단하나 외부진동의 영향이 크고 유량신호가 상대적으로 작다. 궁극적으로 (j)와 같은 측정관이 이상적인 모델이 될 수 있으나 외부 진동으로부터 절연 및 신호의 크기 등이 기술적으로 극복해야 할 점이다.

(a), (b), (c), (e), (f), (h), (i)는 2개의 측정관을 가진

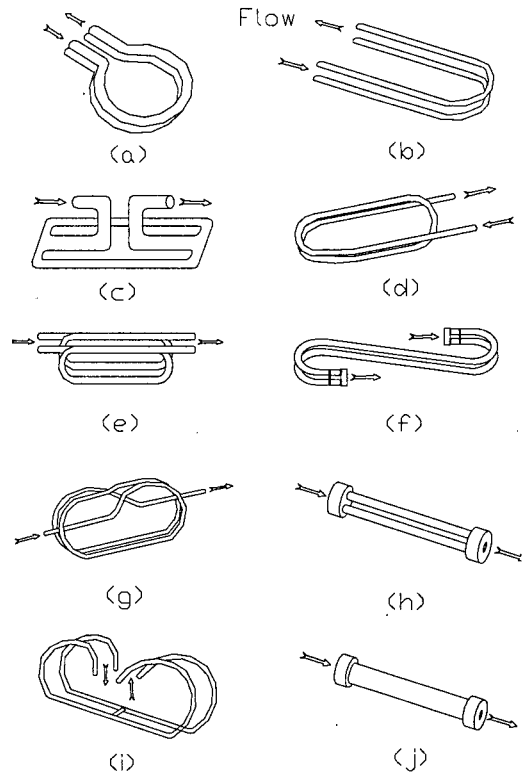


Fig. 1 Configuration of measuring tube

모델로서 U자, 루프, 직관의 형태를 갖추고 있다. 구조적으로 입구의 몸체(body)에서 유체는 측정관 2개로 나누어져 유동하고, 출구에서 다시 합쳐지게 된다. 영구자석과 감지 코일이 측정관에 각각 하나씩 설치되어 상대적으로 외부 진동의 영향을 작게 받도록 설계되어 있다.

U자형과 루프형은 유량신호가 상대적으로 커서 많은 유량계회사들이 채택하는 모델이나 부피가 커지는 단점이 있고 직관형인 (h)는 이와는 반대의 특성을 가지고 있다. U자형이나 루프형은 수백 Hz의 고유진동수와 이와 비슷한 가진진동수를 가지도록 설계한다. 이에 비해 직관형은 1000 Hz 이상의 고유진동수와 가진진동수로 설계한다. 일반적으로 유체에 의해 관로에서 유발되는 진동은 수십 Hz 정도이므로 공진이나 맥놀이 등에 의한 영향을 줄이기 위해 외부 진동 보다 높은 진동수를 가지도록 설계한다. 즉 측정관 재질의 피로를 줄이기 위해서는 낮은 가진진동수가 유리하나 유량신호가 상대적으로 작은 직관형의 경우는 가진진동수를 크게하여 외부 진동의 영향을 줄인다.

측정관은 제조회사들이 보유한 특허이므로 국내외 시장의 진출을 위해서는 이를 침해하지 않는

범위에서 측정관을 독창적으로 설계하는 것이 필요하다. 본 연구의 개발 목표는 U 자형 측정관이 몸체에서 비틀림 힘을 받아 진동하며 고유진동수는 약 220 Hz 인 고유 모델의 CMF의 제작이고, 측정유량범위는 3~30 kg/min, 반복성 ± 0.4 % 이내이다. 한국표준과학연구원과 ㈜하이트롤의 공동 연구로 수행되었으며 본 논문은 관로 직경 15 mm 인 CMF에 대한 개발의 결과를 정리한 것이다.

2. 유량측정의 원리와 특성

직선운동하는 점 질량에 회전운동이 가해지면 코리올리 힘이 작용한다. CMF는 이러한 힘에 의한 측정관 운동의 변화로부터 질량 유량을 직접 측정한다. Fig. 2는 U 자형 측정관이 원 진동수 (circular frequency) w , 진동 각속도 Ω 로 진동할 때 속도 V 로 유동하는 유체에 작용하는 코리올리 힘 (F_c)을 나타낸다.

측정관이 윗 쪽으로 운동할 때 유체가 유입구 (inlet)에서 곡관 부분으로 유동하면 측정관의 운동 방향과 반대로 코리올리 힘이 작용하고, 곡관 부분에서 유출구(outlet)로 유동할 때는 측정관의 운동방향과 같은 방향으로 Fig. 2와 같이 작용한다. 또 측정관이 아래 쪽으로 운동하면 Fig. 2에 표시된 방향과 반대로 작용한다. 따라서 코리올리 힘은 측정관에서 서로 반대방향으로 작용하게 되며 Fig. 3와 같은 비틀림 각을 가지게 된다. 이러한 비틀림 각은 입구와 출구 쪽의 수평면 상에서 관찰하면 시간차를 두고 이동하며 수평면상에 설치된 감지센서가 시간차를 측정하게 된다.

Fig. 3의 비틀림 운동의 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.⁽³⁾

$$I_s \frac{d^2 \theta}{dt^2} + k_s \theta = T \quad (1)$$

여기에서 I_s 는 측정관의 관성 모멘트, k_s 는 탄성 계수를 각각 나타낸다. 측정관의 진동 각속도를 $\Omega = \Omega_0 \cos w t$, 유동하는 유체의 단위 질량을 Δm , 유동속도를 V 라고 하면 단위질량에 작용하는 코리올리 힘은 식 (2)와 같다.

$$\Delta F_c = 2 \Delta m \Omega V \quad (2)$$

또 Fig. 2에서 측정관의 단면적을 A , 폭을 d , 길이를 L 이라 하고 유체의 밀도를 ρ 라고 하면 측정관 전체에 작용하는 토크는 관로를 따라 적분하여 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

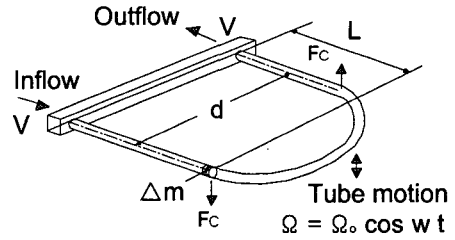


Fig. 2 Generation of Coriolis force

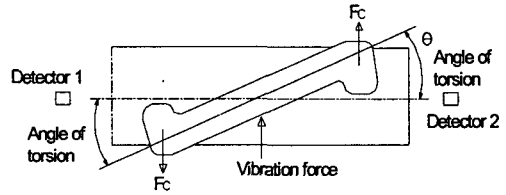


Fig. 3 Torsional vibration

$$\begin{aligned} T &= \int \Delta F_c \cdot d \\ &= 2 k \Omega_0 \rho A V d L \cos w t \\ &= T_0 \cos w t \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 k 는 상수이고, $T_0 = 2 k \Omega_0 \rho A V d L$ 을 나타낸다. 따라서 식 (1)의 해를 구하여 비틀림각의 최대 변위를 구하면 식 (4)와 같이 된다.

$$\theta_0 = \frac{2 k \Omega_0 \rho A V d L}{k_s - I_s w^2} \quad (4)$$

그리고 Fig. 3의 비틀림 진동의 고유진동수는 $w_s = \sqrt{k_s / I_s}$ 라 하고 측정관의 최대 비틀림 변위량 θ_0 에 해당하는 시간차는 $\tau = (d \theta_0) / (L \Omega_0)$ 이다. 시간차와 질량 유량의 관계는 식 (5)와 같이 표현된다.⁽³⁾

$$q_m = \frac{k_s \tau (1 - w^2 / w_s^2)}{2 k d^2} \quad (5)$$

식 (5)에서 측정관의 형상이나 재질이 결정되면 k_s, w, w_s, k, d 는 상수가 된다. 코리올리 힘에 의해 발생하는 비틀림 변위가 측정관 운동의 시간차를 유발하고 시간차가 질량 유량에 비례함을 알 수 있다. 따라서 시간차를 측정하여 질량 유량을 직접 측정할 수 있다. 식 (5)에서 상수들은 설계된 측정관의 재질이나 형상에 따라 결정되지만 실제 제작과정에서 달라지게 된다. 측정관을 유량계 몸체에 브레이징하여 부착하게 되는데 이 때 용접상

태에 따라 탄성계수 및 고유 진동수가 달라진다. 또 측정관이 가진진동수와 고유진동수가 같으면 이론적으로 측정이 불가능한 상태가 되고, 차이가 커지면 시간차 값이 작아져 분해능, 측정범위 등 유량계의 측정성능을 떨어뜨리는 결과를 가져온다. 가진진동수를 고유진동수와 가깝도록 조정하면 가진 에너지를 줄일 수 있으며 적절한 차이를 선택하는 것이 설계의 중요한 요소가 된다.

한편 CMF의 측정관의 질량, 내부를 유동하는 유체의 질량과 진동수는 식 (6)과 같은 관계를 가진다.⁽⁴⁾

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{M_T + \rho V_p}} \quad (6)$$

여기에서 k_s 는 측정관의 탄성계수, M_T 는 측정관의 질량, ρ 는 유체의 밀도, V_p 는 관로 내부의 부피를 각각 나타낸다. 식 (6)으로부터 유체의 밀도를 구하면 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\rho = \frac{k_s}{4\pi^2 V_p} T_t^2 - \frac{M_T}{V_p} \quad (7)$$

여기에서 M_T, k_s, V_p 는 알 수 있으므로 주기 T_t 를 측정하여 밀도를 계산할 수 있다. 이러한 측정방법은 이미 유체 질량을 직접 측정하는 방법으로 활용되고 있으며, CMF에서는 질량 유량 측정과정에서 부가적으로 얻게 된다.

3. CMF의 설계와 제작

CMF는 측정관을 포함한 기계장치부 및 측정된 신호의 처리와 가진기(exciter)를 구동하는 신호처리부로 구성되어 있다. 기계장치부는 측정관, 가진기, 감지센서 및 내부 구조물 및 케이싱으로 구성되어 있다.

Fig. 4는 본 연구에서 개발한 CMF 측정관의 모습을 나타낸 것이다. 접속구경은 15 mm(1/2 inch), 측정관의 직경은 8 mm 이고 재질은 sus 316을 사용하였다. 기계장치부는 플랜지와 측정관이 몸체에 연결되어 있고, 입구로 유입된 유체는 내부에서 2개의 측정관으로 나뉘어 유동하게 되며 측정관은 양 쪽에 동일한 질량 유량이 유동한다. 몸체는 측정관이 안정된 진동을 할 수 있도록 질량이 상대적으로 큰 값을 갖도록 하고 브레이징 용접으로 접합하였다. 같은 방법으로 가진기와 감지센서

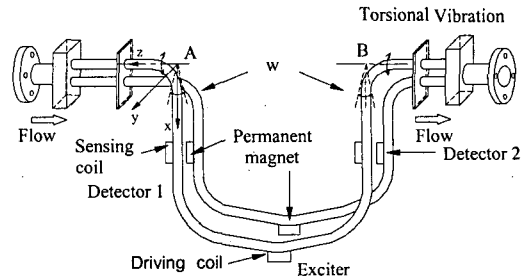


Fig. 4 Schematic illustration of the developed CMF

도 측정관에 부착하였다.

측정관의 안정된 진동특성 유지가 유량계의 성능에 직접적으로 영향을 미치므로 측정관의 부착상태가 일정해야 한다. 측정관 진동은 경계조건에 따라 진동특성이 변하므로 응력을 제거하기 위해 용접 후 열처리하였다. 측정관 2개의 진동은 좌우로 균형이 이루어져야하므로 열처리가 완료된 기계장치부를 사전 검사한 후 감지센서와 가진기에 질량을 부가하여 균형을 이루도록 하였다.

사전검사에서 Fig. 4의 기계장치부를 유연한 끈으로 매달아서 가진시키면 진동방향의 한 쪽으로 기울어지거나 회전하게 된다. 기울어진 정도나 회전의 정도에 따라 부가질량을 부착하면 기계장치부는 회전 없이 수평방향으로 진동하게 되고, 이때 좌우 및 2개의 측정관의 질량이 대칭이 된다고 판단하였다.

개발된 CMF의 고유진동수는 220 Hz로 설계했으며 같은 가진 주파수 진동시키고 고유진동수를 측정해 본 결과 210~230 Hz로 나타났다. 사전검사 과정에서 부가질량을 이용하여 고유진동수를 가진 주파수 220 Hz에 가깝도록 조정하였다. 사전검사에서 조정된 고유진동수는 실제로 유체를 측정할 때는 질량이 증가하기 때문에 고유진동수가 감소하게 된다. 또 다양한 유체를 측정해야 하므로 정확한 조정이 의미가 없게 되고, 물인 경우는 10% 정도 고유진동수가 감소하였다.

측정관은 약 220 Hz의 주파수로 수 년 동안 진동 특성의 변화 없이 진동해야 하므로 재질의 기계적 성질의 변화가 없어야 한다. 가진기가 부착된 위치에서 변위가 작아야 재질의 탄성계수의 변화를 줄일 수 있다. 그런데 감지센서에서는 일정한 시간차를 유지하여야만 적절한 측정범위와 분해능력을 유지할 수 있다. 가진기가 부착된 위치에서 측정관은 최대 변위는 0.05 mm 정도로 유지되도록 하였고 고속카메라로 촬영하여 크기를 확인하였다. 이 때 설계된 변위는 재질의 탄성영역

의 1% 이내이었고, 시간차는 최대 설계 유동율에서 20 μs가 유지된다.

측정관의 안정된 진동을 유지하기 위해 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 측정관이 부착된 몸체에서 비틀림 힘을 받도록 설계하였다. 이는 Fig. 1(b)와 같이 측정관이 몸체에 직각으로 부착되어 외팔보 형태에서 진동하는 것보다 재질의 변화가 적을 것으로 판단된다. Fig. 4에서 가진기는 측정관 한쪽에는 영구자석을, 다른 한 쪽에는 전자석을 부착하여 전자석은 내부, 영구자석이 외부에서 자기장의 방향에 따라 서로 상대적인 운동하도록 한다. 측정관의 최대변위가 0.05 mm가 되도록 코일의 회전수와 전류의 흐름을 조정하였고, 이때 가진기의 구동 코일은 3000 Gs의 자속밀도가 생성되었다.

Fig. 5는 드라이 테스트(dry test) 중인 기계장치부의 내부구조를 나타낸 사진이다. 측정관의 양쪽에 감지센서를 장착할 수 있는 구조물이 측정관에 용접되어있으며 사전검사에서 부가질량을 부착할 때는 너트형 질량을 부가하고 감소시킬 필요가 있을 때는 구조물의 일부를 제거하여 조정한다.

코일의 자기장에 의한 가진 장치의 가진력은 식 (8)과 같다.

$$F = Bi\ell \tag{8}$$

여기에서 B는 자속 밀도, i는 코일에 흐르는 전류, ℓ은 코일 스펴의 길이이며 3 mm이다.

감지센서는 코일내부에 자성체가 움직일 때 감지센서 코일에 유기되는 기전력으로 위치를 측정하며 기전력 V_{sig} 는 식 (9)와 같다.

$$V_{sig} = B\ell v \tag{9}$$

여기에서 B는 자속 밀도, ℓ은 스펴의 길이, v는 감지센서가 부착된 위치에서 측정관의 선 속도를 각각 나타낸다. 자속 밀도 B=3000 Gs, ℓ=3 mm이고 가진 주파수가 220 Hz일 때 출력신호가 120 ~ 140 mV가 되도록 하였다.

Fig. 6은 완성된 CMF의 기계장치부를 나타낸 것으로 Fig. 5의 가진기와 측정센서가 부착된 측정관을 케이싱으로 밀봉한 모습이다. 케이싱으로 밀봉하기 전에 내부에는 질소가스를 주입하여 발열에 의한 코일의 특성변화와 오랜 시간 진동으로 인한 측정관 재질의 탄성계수 등 기계적인 변화를 방지하도록 하였다. 케이싱은 측정관이 부착된 몸체와 용접되어 일체형으로 제작되었으며 외부의 기계적인 진동으로부터 절연이 되도록 내부의 4

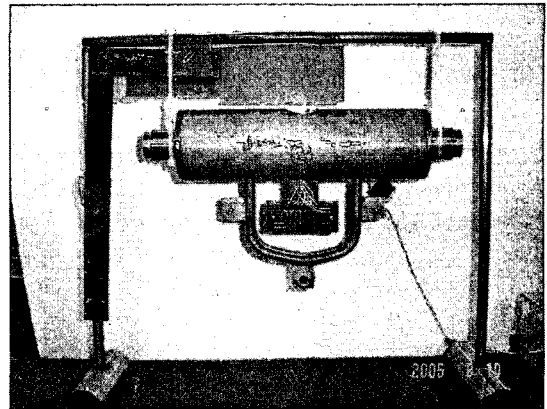


Fig. 5 Dry test of measuring tube

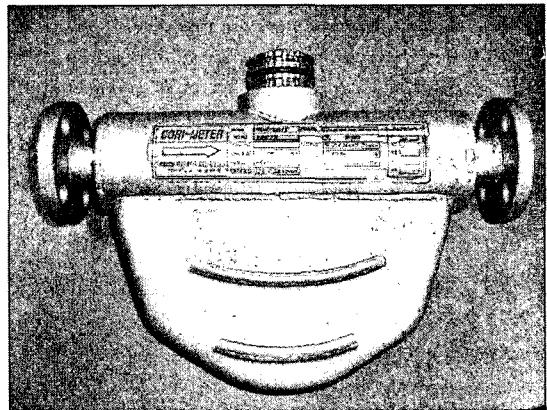


Fig. 6 Mechanical part of the developed CMF

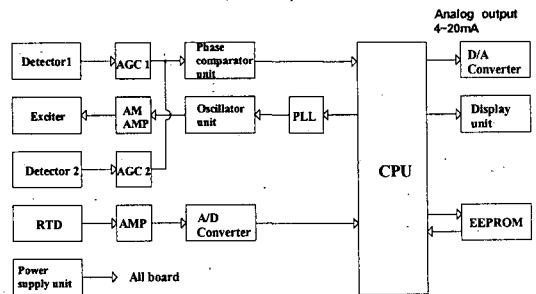


Fig. 7 Schematic diagram of signal processing circuit

각 파이프와 외부의 원형 파이프를 용접하여 2중 절연구조로 되어있다.

신호처리부는 Fig. 7과 같이 아날로그 및 디지털 회로부, 입출력 포트 및 전원공급 회로 등 4부

분으로 구성되어 있다. 아나로그 회로부는 감지센서와 온도센서의 신호를 측정하여 디지털처리회로에 입력하고, 가진기의 가진 신호를 PLL(phase lock loop)를 이용하여 일정한 주파수로 출력하는 기능을 가지고 있다.

감지코일에서 측정된 유량신호(측정관 운동의 시간차)는 AGC(auto gain controller)를 통해 신호처리와 이득이 조절된다. 이득이 조절된 유량신호는 위상비교기(phase comparator)를 거쳐 디지털 회로처리부의 CPU로 입력된다. 그리고 측정관에 부착되어 있는 백금저항센서의 온도측정값도 신호가 증폭되어 A/D converter를 통해 디지털 데이터로 변환되어 CPU로 입력된다. 디지털회로부의 CPU는 감지코일의 위상차와 온도 측정값으로부터 기억소자(EEPROM)의 프로그램 따라 질량 유량과 유체의 질량을 계산한다.

입출력 포트에서는 CPU에서 계산된 질량 유량값의 D/A converter를 통해 4-20 mA의 아나로그 신호 또는 펄스 신호로 변환하여 출력하고, 이는 질량 유동율 및 유동량으로 표시된다. 이와 같이 기본적인 신호의 입출력 및 처리는 아나로그 회로부에서 이루어지고, 마이크로 프로세서는 기억소자의 프로그램에 따라 질량 유량과 유체의 질량을 연산한다.

디지털 회로부에서는 컴퓨터와 신호교환이 가능하도록 RS-232 인터페이스 회로가 내장되어 있다. 따라서 CMF가 설치된 장소에서 질량 유량을 직접 표시하거나 원거리로 전송하여 제어신호로 활용이 가능하도록 하였다.

4. 특성 실험 및 논의

CMF의 질량 유량은 측정관의 형상과 재질 및 진동 특성을 알면 식 (5)에 의해 엄밀하게 표현된다. 앞 절에서 언급했듯이 제작과정에서 형상과 진동 특성을 균일하게 유지할 수 없을 뿐 아니라 재질의 탄성계수도 온도에 따라 변하게 된다. 실제로 제작과정에서는 Fig. 5과 같이 드라이 테스트 등 사전 특성 검사를 통하여 진동의 조건을 조정하지만, 최종 질량 유량을 직접 표시하기에는 가변적인 요소가 잠재되어 있다. 이러한 가변적인 잠재 요소의 변화에 대한 보정은 기억장치에 내장된 프로그램에 의해 이루어진다.

최종적으로 유량계의 측정값은 교정장치에서 확인된 기준 질량 유량값을 근거로 하여 시제품 CMF의 측정값을 거꾸로 정의한다. 유량계의 제작이나 사전검사 과정 중에 측정범위에서 선형성이 유지되도록 진동에 영향을 미치는 요소를 1차

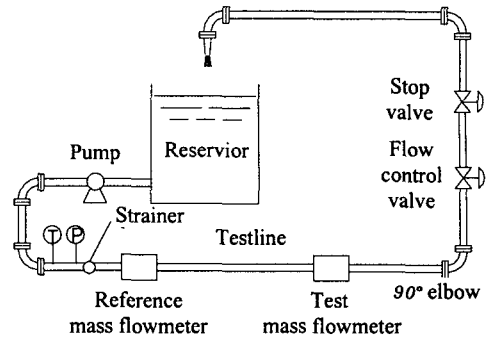


Fig. 8 Flowmeter calibrator for correction factor adjustment

적으로 보정한 후, 최종적인 보정값은 교정장치에서 측정된 값을 근거로 프로그램에서 결정한다.

본 연구에서는 Fig. 8과 같은 교정장치의 기준 질량 유량계를 이용하여 시제품 CMF를 조정하고 특성을 확인하였다. 교정장치의 측정원리는 기준 유량계와 시제품 CMF 사이에 누설이 없으면 연속법칙에 따라서 2개의 측정값이 같아야 한다.

기준유량계는 교정을 통해 유량의 국가 표준을 소급받은 M사의 기준기급 질량 유량계를 사용했으며 측정범위는 0-32.5 kg/min, 정확도(accuracy)는 측정값의 $\pm 0.1\%$, 반복성은 $\pm 0.05\%$ 이었다. 실험 방법은 유동을 조절밸브로 시제품의 설계 유동율 범위에서 조절하고, 정지밸브(stop valve)로 각각의 유동율에서 기준유량계와 시제품 유량계의 측정값을 비교하였다.

시제품의 선형성과 측정범위를 조절하기 위해 식 (10)의 상수값 C_1 과 C_2 값을 조절하는데 이는 기억소자에 프로그램되어 있으며 제작 후 실험 결과에 따라 입력한다.

$$q_m = \frac{(C_1 - C_2 \Delta T) \theta}{w} \quad (10)$$

여기에서 C_1 은 CMF 측정값의 선형성에 관련된 상수이며 C_2 는 측정관 재질의 온도에 따른 탄성계수의 변화를 보정하는 상수이다.

상수의 결정방법은 시제품 측정값 q_m 이 기준 질량 유량계의 측정값과 동일하게 나타나도록 상수를 조절한다. 조절방법은 유동을 정지시키고 시제품의 영점을 조절하며, 이때 노이즈에 의한 측정값을 제거한다. 상수 C_1 의 조정은 값을 변화시키면서 입력하고 기준유량계와 시제품을 최소, 중간, 최대 유동율에서 측정값을 비교한다. 3개의 유동율에서 유량 측정값의 평균 차이 만큼 C_1 의

값을 수정한 다음 다시 입력하여 처음의 실험을 반복한다. 상수 C_1 을 결정하는 과정은 측정값의 선형성과 측정범위를 정하는 과정이 된다.

상수 C_2 는 측정관의 탄성 계수를 보정하는 과정이며 유체가 정지되어 있을 때 20 ℃를 기준으로 한다. C_2 를 입력하고 기준유량계와 시제품의 측정값을 비교하면서 조정한다. 실제 측정에 있어서 ΔT 값은 측정관 외부에 부착된 백금 저항온도계(PT 100 Ω)에 의해 측정되며 질량 유량값의 보정에 사용된다. C_2 값의 조정은 기준값으로부터 편차를 조정하는 과정이다.

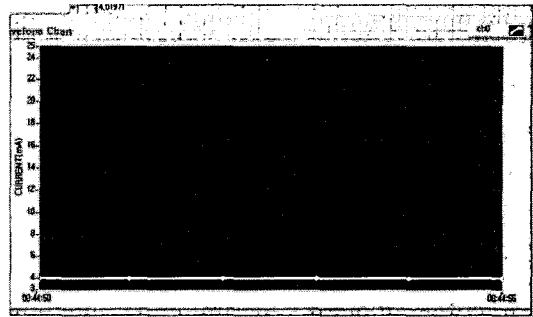
유체밀도를 측정하는 방법에서도 유량측정과 마찬가지로 보정인자의 값을 신호처리부의 기억소자에 입력하여 사용한다. 밀도측정용 보정인자도 공기 및 물의 밀도와 온도에 따른 보정인자 3 가지를 조절한다. 측정관이 빈 상태와 물로 충만시킨 상태의 측정값을 기준으로 하고, 온도 보정인자를 기억소자에 입력한다.

시제품 CMF 는 보정인자의 조정값을 입력한 다음 중량식 유량계 교정장치⁽⁵⁾로 교정하고 특성을 확인하였다. 중량식 교정장치는 ISO 에서 권고하는 방법⁽⁶⁾에 따라 불확도를 평가했으며, 이때 질량 유동량 측정 불확도는 0.1% 이내이었다.

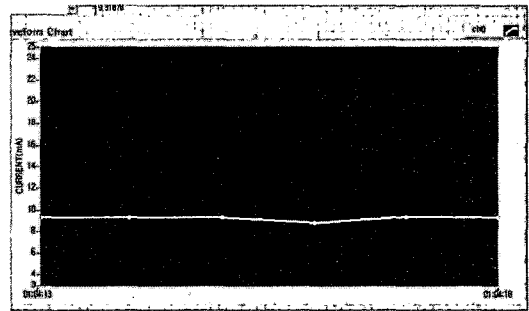
Fig. 9 는 유동율이 zero 일 때와 약 10, 20, 30 kg/min 일 때의 아날로그 출력 신호를 나타낸 것으로 각각 약 4.0, 9.3, 14.3, 20.0 mA 의 값을 보이고 있고, 유동율에 비례하는 전류신호가 출력됨을 알 수 있다. 이러한 출력신호는 A/D 변환기(converter)를 통해서 펄스 신호로 변환되며, 유동율을 직접 나타낼 때는 펄스의 주파수를, 유동량은 펄스의 합으로 표시된다.

Fig. 10 은 중량식 유량계 교정장치를 이용하여 시제품 CMF 를 교정한 결과이다. 실험방법으로서 시제품 CMF 의 유동량 측정값과 교정장치의 수집탱크에 수집된 유체의 측정값을 비교하였다. 유동율을 1 kg/min 에서 30 kg/min 까지 변화시키면서 실험했으며, 상대적으로 작은 유동율에서는 유동율의 간격을 줄여서 실험하였다.

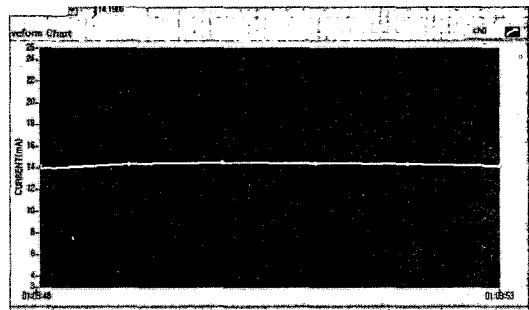
식 (10)에서 상수 C_1 과 C_2 를 조정한 결과 실험 유동율 범위에서 편차는 0.1% 정도 이었으며 이는 유동율에 따른 선형성이 유지되고 있음을 의미하고 Fig. 9 의 전류 신호에서도 이를 확인할 수 있다. 실험 유동율 10 kg/min 이상의 범위에서는 $\pm 0.1\%$ 이내의 반복성을 보이고 있으나 유동율 5 kg/min 이하에서는 $\pm 0.4\%$ 로 상대적으로 큰 값을 보이고 있다. 유동율이 작을 때 유량신호가 상대



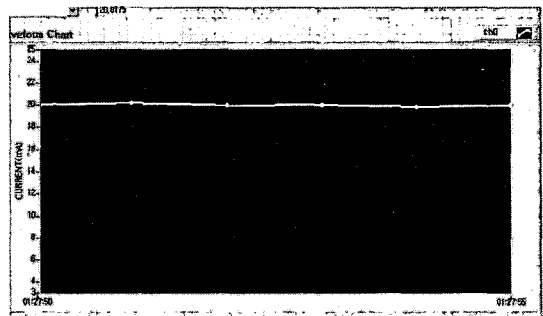
(a) Flowrate 0 kg/min, output 4.02 mA



(b) Flowrate 9.97 kg/min, output 9.34 mA



(c) Flowrate 19.37 kg/min, output 14.35 mA



(d) Flowrate 29.98 kg/min, output 20.01 mA

Fig. 9 Analogue output of the developed CMF

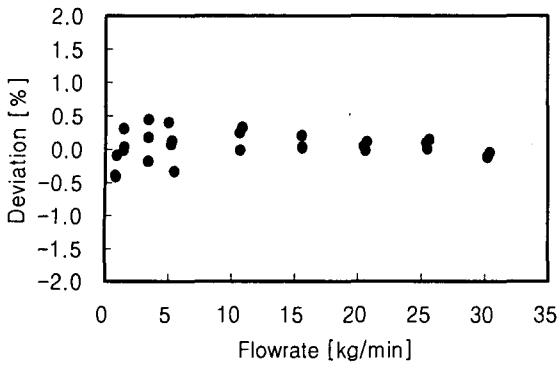


Fig. 10 Calibration results of the developed CMF

적으로 작아지기 때문에 S/N 비가 작으므로 CMF 측정값의 반복성이 나빠지고 편차가 커지게 되며 이는 대부분의 유량계가 가지는 일반적인 특성이다.

시제품 CMF의 측정범위를 설정하는 것은 측정 불확도의 크기를 결정하는 직접적인 요소가 되며 측정불확도 평가는 최소 유동율을 기준으로 하는 것이 안전하다. Fig. 10에서 측정범위 10:1을 고려하면 전체 측정범위에서 $\pm 0.4\%$ 이내의 반복성을 보이고 있으나, 낮은 유동율을 제외하면 $\pm 0.1\%$ 반복성을 유지하고 있다. 이와 같이 불확도 평가는 측정범위에 따라 달라진다.

기존 상품의 CMF와 비교하여 측정범위 내에서 반복성은 비슷한 수준을 보이고 있으며 산업현장에서 활용이 가능하다고 판단된다. 다만 실험실의 조건이 아니라 산업현장과 같은 다양한 조건의 실험환경에서 장기 안정성에 대한 실험이 보완되어야 할 것이다. 특히 CMF는 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이상의 고온 액체나 고점도 액체를 측정할 수 있는 장점이 있으나 실용화를 위해서는 측정성능의 안정성을 확인하는 것이 필요하다.

5. 결론

질량 유량을 직접 측정할 수 있는 고유 모델의

코리올리 질량 유량계(Coriolis mass flowmeter: CMF)를 개발하였으며 CMF는 측정관을 포함한 기계장치부, 신호처리부 및 프로그램으로 구성되어 있다. 성능을 확인하기 위한 특성 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 공칭 직경 15 mm인 CMF의 기계장치부, 신호처리부 및 신호처리를 위한 프로그램을 개발하였으며, 이를 통하여 설계 및 제작 기술을 확보하였다.

(2) 시제품은 중량측정법의 교정장치로 특성을 확인한 결과, 10:1의 유동율 범위(3 kg/min~30 kg/min)에서 반복성은 $\pm 0.1\sim\pm 0.4\%$ 를 보였다.

(3) 시제품이 보다 높은 신뢰성을 얻기 위해서는 장기 안정성 시험이 필요하고, 적용범위를 확대하기 위해서는 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이상의 유체와 고점도 유체에 대한 측정 특성 시험이 요구된다.

(4) 소형 CMF의 개발 과정에서 얻은 경험을 바탕으로 50 mm 이상의 CMF에 대한 설계 및 신호처리 기술과 측정정확도 향상을 위한 데이터를 확보할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Li, Y. T. and Lee, S. Y., 1953, "A Fast Response True Mass Rate Flowmeter," *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs.*, Vol. 75, pp. 835~841.
- (2) Medlock, R. S., 1989, "A Review of the Techniques of Mass Flow Measurement," International conference on mass flow measurement, London, England.
- (3) 日本計量機器工業連合會, 1995, "流量計測 A to Z," 第10章, pp. 161~183.
- (4) Tse, F. S., Morse, I. E. and Hinkle, R.T., 1978, "Mechanical Vibrations(second edition)," Allyn and Bacon, Inc.
- (5) Ki Won Lim, 2001, "A Study on the Measurement Uncertainty of Flowmeter Calibrator," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 25, No. 4, pp. 561~571.
- (6) ISO 4185, 1983, Measurement of Liquid Flow in closed conduits - Weighing Method.