

온도변화에 따른 터빈유량계의 성능 시험

남기한* · 박종호** · 김홍집** †

Performance Test of Turbine Flowmeter According to Temperature Variation

Nam Ki Han*, Park Jong Ho**, Kim Hong Jip** †

Key Words : Turbine Flowmeter(터빈유량계), Calibration(교정), Reynolds Number Effect(레이놀즈 수 영향), Density Effect(밀도 영향), Temperature Effect(온도 영향), Retarding Torque(지연 토크)

ABSTRACT

In general industry, TFM(turbine flow meters) as measuring instruments having high reliability are widely used in the trade of petroleum and in the measurement of tap water and hot water. The TFM is performed calibration for using in the field and is mainly calibrated at room temperature. Since accuracy of TFM depends on Reynolds number of fluid, TFM is calibrated at same Reynolds number by changing flow rate. Furthermore, the TFM using a fluid of high temperature should have considered for other factors such as the thermal expansion of the parts and characteristics change is unknown changes in the turbine flow meter accordingly. In this paper, two turbine flowmeter are experimentally studied about characteristics change using the facilities which can change fluid temperature from 6 degree celsius to 90 degree celsius. As a result, the turbine flow meter can be calibrated to minimize the error characteristic at a similar temperature and the actual temperature.

1. 서 론

유량계는 배관 내부를 흐르는 유체의 양을 측정하는 계기로서 발전, 석유화학, 건설, 조선 등 모든 산업분야에서 널리 사용되고 있다. 유량계는 측정원리에 따라 터빈 유량계, 용적 유량계, 와 유량계, 초음파 유량계, 차압 유량계 등 다양한 형태가 있다.

산업이 고도화됨에 따라 높은 측정정확도를 요구하고 있으며 기술의 발달로 유량계의 측정정밀도도 높아지고 있다. 하지만 측정정밀도가 높은 유량계라 하더라도 교정 상태에 따라 현장에서 유량측정의 결과가 달라질 수 있다. 일반적으로 유량계는 레이놀즈수에 영향을 받는 것으로 알려져 있어 다수의 교정설비들은 실제 사용 유체와 유사한 레이놀즈수에서 교정할 수 있도록 다양한 종류의 실험유체를 보유하고 있다.

통상적으로 유량계의 교정은 상온에서 실시하고 있지만

실제 사용온도는 교정 시의 온도보다 50℃에서 200℃ 이상 높은 경우가 많다. 유량계를 사용할 때 온도 상승에 따른 유량계의 체적 팽창에 대해서는 보상을 실시하고 있지만 용적 유량계나 터빈 유량계와 같이 기계적 회전체를 가지는 유량계는 구성부품의 열팽창에 따라 내부 부품의 기계적 공차가 변화하기 때문에 측정특성이 변화할 가능성이 매우 높다.

하지만 유량계의 교정온도와 실제 사용온도의 차이에 따른 측정특성의 변화는 잘 알려져 있지 않다. 국제적으로 석유류를 거래할 때 널리 사용하는 터빈유량계의 특징 및 온도와 압력에 따른 유체부피의 환산방법은 미국석유협회 규격에 나와 있지만 온도에 따른 측정특성 변화에 대해서는 설명이 되어 있지 않다.⁽¹⁾ 경질유의 거래는 상온에서 이루어지고 있지만 벵크 C와 같은 중질유는 약 80℃의 조건에서 거래가 이루어지고 있어 실제 사용온도가 유량계 교정 시의 온도와 큰 차이가 있다. 또한 지역난방 발전소에서 가정으로 보내는 온수의 온도는 60℃ 이상으로 유량계를 교정한 온도와 큰 차

* (주) 우진(WOOJIN INC.)

** 충남대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

† 교신저자, E-mail : khongjip@cnu.ac.kr

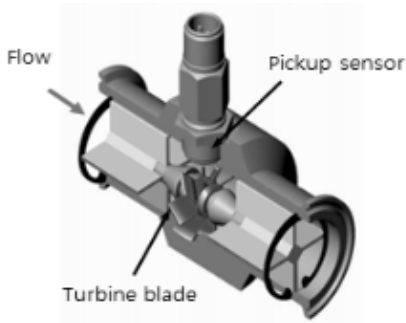


Fig. 1 Illustration of an axial-flow turbine flowmeter (Created by Flow technology)

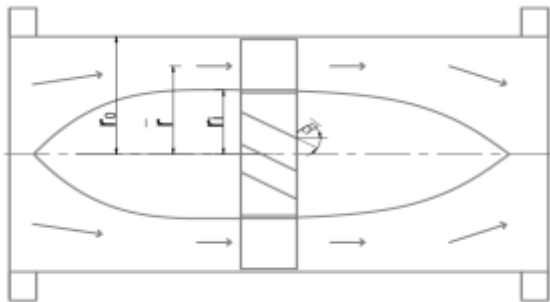


Fig. 2 Schematic drawing of an axial-flow turbine flowmeter

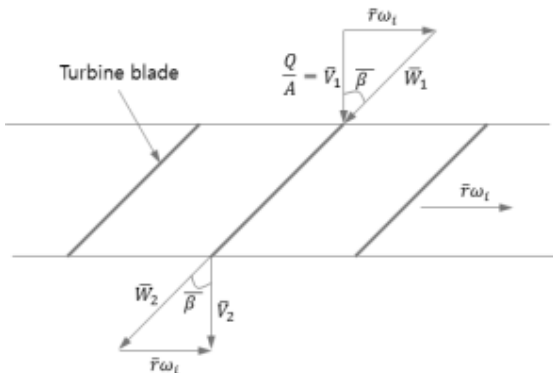


Fig. 3 Velocity diagrams for rotor-blade elements at radius \bar{r}

이를 보이고 있다.

터빈유량계는 사용온도가 높은 경우 베어링, 유량계 내경, 터빈날개의 부피팽창 등의 영향으로 상온에서 교정한 결과와 다른 측정특성을 보일 수 있다.

본 연구에서는 온도에 의한 터빈유량계의 성능을 확인하기 위해 실험유체인 물의 온도를 6°C부터 90°C까지 일정한 간격으로 상승시키며 터빈유량계의 측정오차를 구하여 온도 변화에 따른 측정특성을 확인하였다.

2. 터빈유량계

2.1 터빈유량계의 측정원리

터빈유량계는 Fig. 1과 같이 원형 배관형태의 본체와 유체

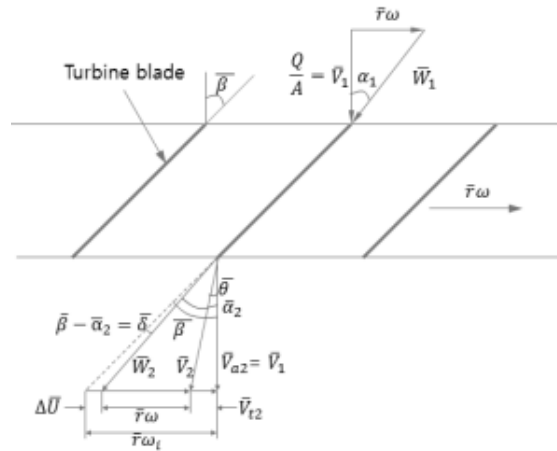


Fig. 4 Velocity diagrams for rotor-blade elements at radius \bar{r} -real case

가 흘러가면 축을 중심으로 회전하는 날개를 가지고 있으며 날개 회전수는 유속에 선형적으로 비례하는 특징이 있다. 본체에 부착된 센서로 회전하는 날개의 회전수를 감지하여 유량으로 표시하게 된다. Fig. 2에 나타난 것과 같이 터빈유량계 날개의 아래 부분(r_i)과 바깥 부분(r_o)에서의 유동조건은 서로 다르기 때문에 해석을 위해 평균 유동조건이 존재하는 반경(\bar{r})을 가정하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{r} = \left(\frac{r_o^2 + r_i^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

터빈유량계의 기계적 마찰이 없고 마찰력이 없는 유체가 유속 \bar{V}_1 으로 정확히 축방향으로 들어간다고 가정하면 Fig. 3의 속도선도에 따라 터빈날개의 이상적 회전속도($\bar{r}\omega_i$)를 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{r}\omega_i = \bar{V}_1 \tan \bar{\beta} = (Q/A) \tan \bar{\beta} \quad (2)$$

여기서 Q는 유량, \bar{r} 는 날개의 평균회전반경, A는 유체가 흐르는 단면적, $\bar{\beta}$ 는 날개의 설치각도, ω_i 는 날개의 이상적 각속도를 의미한다.

그러나 실제 유동에서는 터빈유량계의 기계적 마찰과 유체의 마찰력이 발생하여 지연 토크(retarding torque, M_r)가 존재하며 터빈 날개의 이상적 각속도(ω_i)와 실제 각속도(ω)는 차이가 생긴다. Fig. 4는 실제 유동에서의 속도선도를 보여주고 있다. 유체는 터빈 날개를 통과하면서 지연 토크와 동일한 크기의 각 운동량을 발생시키며 터빈날개 출구에서 유속(\bar{V}_2) 방향이 굴절된다. 따라서 각 운동량과 지연 토크는 같은 크기를 가지며 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{r}\rho Q \bar{V}_{i2} = M_r \quad \text{또는} \quad \bar{V}_{i2} = M_r / \bar{r}\rho Q \quad (3)$$

여기서 \overline{V}_{i2} 는 터빈 날개 출구에서 속도 \overline{V}_2 의 접선방향성분이다. 식 (3)에서 지연 토크가 증가하면 접선방향성분도 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 $\Delta\overline{U}$ 는 터빈 날개의 각도 β 와 터빈날개 출구의 유속각도 α_2 에 의해 영향을 받는 날개 속도의 손실로서 $\Delta\overline{U}=\eta\overline{V}_{i2}$ 로 나타낼 수 있다. η 는 편차팩터로서 실험을 통해 구한다. 따라서 지연 토크가 증가하면 \overline{V}_2 의 접선방향성분 \overline{V}_{i2} 가 증가하게 되고 비례적으로 속도손실 $\Delta\overline{U}$ 도 증가하여 터빈날개의 속도가 떨어지는 것을 알 수 있다.⁽²⁾

따라서 터빈유량계의 기계적 마찰력과 유체의 마찰력을 고려한 실제의 터빈 날개 회전속도($\overline{r\omega}$)는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{r\omega} = \overline{r\omega_i} - \overline{V}_{i2} - \Delta\overline{U} \quad (4)$$

2.2 터빈유량계의 성능특성

터빈유량계는 정확성과 재현성이 우수하여 현재까지 수십 년 동안 다양한 산업분야에서 사용되어 왔다. 현재에도 석유류의 거래와 교정기관들의 교정용 기준기로서 중요하게 사용되고 있다. 이상적인 상태의 터빈유량계는 식 (2)에 의해 유량을 계산할 수 있지만 실제 사용에 있어서 다양한 원인에 의해 날개의 각속도가 달라지기 때문에 교정을 통해 보정계수를 구하여 사용한다.

1962년 Montgomery는 축 베어링의 마찰력에 의한 지연 토크, 사용하는 유체의 점도, 유량계의 수직 또는 수평 설치에 따른 영향, 날개 후단의 압력, 유량계의 입구로 유입되는 유체의 유동형태에 따라 터빈유량계의 성능특성이 달라지는 것을 실험적으로 확인하여 그 결과를 발표하였다.⁽³⁾

국내에서도 파이프 프루버, 기준유량계, 중량측정장치를 기준기로 하여 물, 경유, 등유 등의 다양한 실험유체로 터빈유량계를 실험하여 유량 및 점도에 따라 성능특성이 변하는 것을 확인하는 연구가 실시되었으며 각 기준기의 성능을 비교하는 자료로서 활용하였다.⁽⁴⁾

또한 2000년 슈퍼컴퓨터를 이용하여 터빈유량계의 설계 기술 습득을 위해 수치해석을 통해 날개주변의 압력과 유속 분포에 대한 연구가 진행되었다. 비압축성 해석 프로그램으로 터빈유량계의 압력분포, 유동각, 상대속도벡터, 후류에서의 유동에 대해 수치해석을 하여 터빈날개를 통과한 후의 압력이 크게 낮아지는 것과 날개 선단에서 약간의 와류가 발생하는 것을 확인하였다.⁽⁵⁾

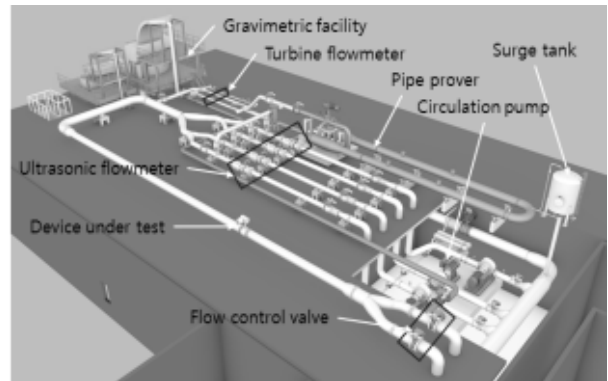
3. 터빈 유량계 유량시험

3.1 유량계 시험장치

2015년 (주)우진에서 한국표준원전 주급수 유량의 레이놀

Table 1 Specification of WOOJIN high Reynolds number calibration facility

Category	Specification
Reynolds number	Max 2.5×10^7
Uncertainty	0.08%
Flow	Max 12 000 m ³ /h
Temperature	Amb. ~90°C



(a) Schematic illustrations of facility



(b) Photograph of facility

Fig. 5 High Reynolds number calibration facility

즈수를 실현할 수 있는 최대유량 12 000 m³/h, 최고온도 90 °C, 최고 레이놀즈수 2.5×10^7 의 교정설비를 건설하였다. 교정설비의 주요 구성요소는 순환펌프, 파이프 프루버, 기준유량계⁽⁶⁾인 초음파 유량계와 터빈유량계, 중량식 측정장치⁽⁷⁾, 가열장치 등으로 구성되어 있다. Fig. 5의 (a)는 고 레이놀즈수 교정설비의 주요 설비의 배치가 나타나 있으며 (b)는 실제 설비의 모습이다. 설비의 주요사양은 Table 1과 같다.

본 연구에서는 고 레이놀즈수 설비의 일부 장치를 이용하였다. 터빈유량계의 온도변화에 따른 측정특성 변화를 실험하기 위해 온도 상승에 의한 유체증발손실이 없고 유체의 종류와 유량변동에 영향을 받지 않으며 온도와 압력변화에 따른 부피변화는 보정계수로 보정하여 사용하는 파이프 프루버를 기준기로 이용하였다. 파이프 프루버는 Fig. 6에서 보는 것처럼 루프파이프(loop pipe)에 정해진 간격으로 2개의 디텍터 스위치(detector switch)가 설치되어 있고 내부에는 루프파이프 내경보다 102%~105%의 직경을 가지는 탄성이

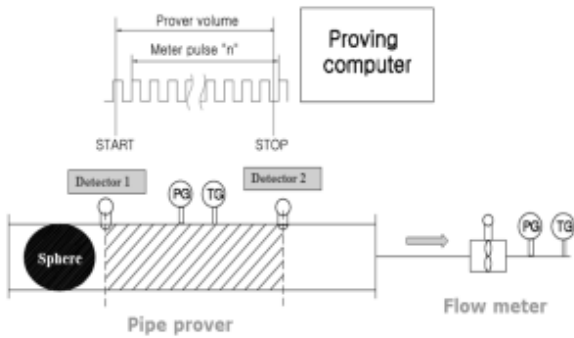


Fig. 6 Measurement principle of pipe prover



Fig. 7 Photograph of pipe prover



Fig. 8 Photograph of turbine flowmeter for flow test

있는 스피어(sphere)가 들어 있는 형태이다. 파이프 프루버와 유량계는 직렬로 연결되고 유체의 흐름에 따라 스피어가 루프파이프 내부를 이동한다. 스피어가 첫 번째 디텍터 스위치를 지나는 순간 유량계의 출력펄스의 수집이 시작되고 두 번째 디텍터 스위치를 지나는 순간 출력펄스의 수집이 종료된다. 2개의 디텍터 스위치 사이의 빛금친 부피(기준부피)는 사전에 실험을 통해 확인한 값으로 기준부피와 유량계의 수집펄스를 비교하여 오차를 구하게 된다. Fig. 7은 본 연구에서 사용한 파이프 프루버이다.

파이프 프루버의 후단에는 Fig. 8과 같이 250A 터빈유량계 2대가 병렬로 설치되어 있으며 온도변화에 따른 터빈유량계의 측정특성 실험에 시료로 사용하였다.

3.2 유량실험의 목적 및 방법

본 연구에서는 온도변화에 따른 터빈유량계의 측정특성 변화에 대하여 관찰하고 그 결과를 분석하고자 한다. 터빈유량계를 상온에서 교정하였을 경우 사용온도가 높아질수록 터빈날개, 날개축 베어링, 유량계 내경 등의 부피팽창이 발생할 것이다. 이 결과로 내부공차의 변동으로 지연 토크에 영향을 주어 유량측정 특성에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상할 수 있으나 공차변화의 정도를 실측하여 지연 토크의 변화량을 계산하고 이것으로 유량측정 특성변화를 확인하는 것은 너무 많은 변수를 고려해야 하므로 대단히 어려운 문제이다. 따라서 본 연구에서는 파이프 프루버를 이용, 터빈유량계의 온도별 유량실험 결과를 구하여 온도변화에 따른 유량측정특성을 분석하였다.

실험은 유체온도 6°C에서 터빈유량계 1번을 유량 400, 800, 1200, 1500 m³/h의 순서로 실시하고, 터빈유량계 2번에 대해서도 같은 순서로 실시하였다. 가열장치를 이용하여 물의 온도를 20°C로 상승시킨 후 동일한 방법으로 유량실험을 실시하였고 이후에는 10°C 간격으로 온도를 상승시키며 90°C까지 총 9 단계의 온도에서 유량실험을 하며 터빈유량계의 측정특성을 관찰하였다. 측정의 신뢰성을 높이기 위해 각각의 터빈유량계에 대해 400, 800, 1200, 1500 m³/h의 각 유량에서 3회 반복실험 하였다. Table 2에는 실험온도와 실험유량, 실험회수를 표시하였다. ASME PTC 6 steam turbine 성능시험 규격⁽⁸⁾에는 급수 유량계를 가급적 사용조건과 같은 레이놀즈수에서 교정하여 사용하도록 권고하고 있는데 터빈유량계의 온도에 따른 측정성능 변화와 비교하기 위해 레이놀즈수에 따른 측정오차변화도 분석하였다. 레이놀즈수는 서로 독립적인 두 유동의 동적상사성을 판별하는 무차원의 수로서 식 (5)로 표현할 수 있다. 여기서 v 는 유속, D 는 배관내경, ν 는 동점도를 나타낸다.

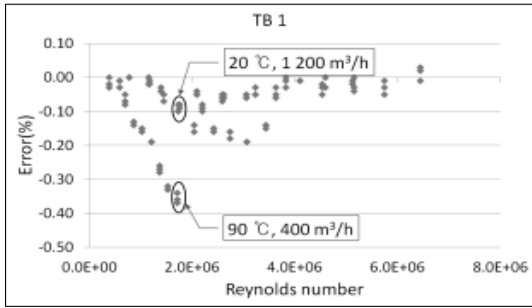
$$\text{Reynolds number} = \frac{vD}{\nu} \quad (5)$$

3.3 온도변화에 따른 유량실험 결과 분석

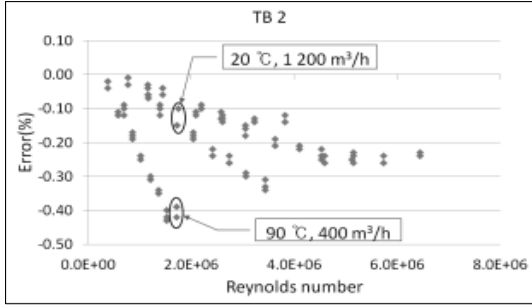
온도를 상승시키며 유량실험을 하였기 때문에 교정성적서에 표시된 파이프 프루버의 기준부피(base volume : 0°C, 대기압 일 때의 부피)에 대해 식 (6)과 같이 온도와 압력을 보정하여 파이프 프루버 환산부피(V_p)를 구하여 사용하였다. 터빈유량계에 대해서도 식 (7)을 사용하여 환산부피(V_m)를 구하여 사용하였다.

Table 2 Test flowrate according to temperature

Temp. (°C)	6, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90
Flow rate (m ³ /h)	400, 800, 1200, 1500 per each temp.
Number of times	3 times per each flow rate

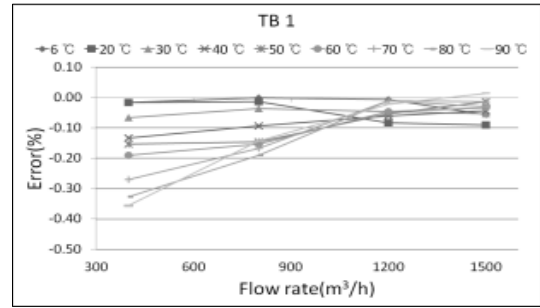


(a) Turbine flowmeter #1

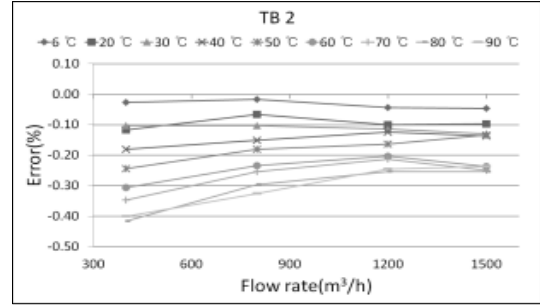


(b) Turbine flowmeter #2

Fig. 9 Error of turbine flowmeter by Reynolds number



(a) Turbine flowmeter #1



(b) Turbine flowmeter #2

Fig. 10 Error of turbine flowmeter by temperature change

$$V_p = \text{prover volume} \times C_{tsp} \times C_{tl} \times C_{psp} \times C_{pl} \quad (6)$$

$$V_m = \text{flowmeter volume} \times C_{tl} \times C_{pl} \quad (7)$$

여기서 온도에 의한 재질의 부피변화 보정계수

$$C_{tsp} = 1 + 3\alpha(T - T_s)$$

α : 재질의 선 변화율(0.000011/°C)

T : 실험온도(°C)

T_s : 기준온도(15 °C)

온도에 의한 액체의 부피변화 보정계수

$$C_{tl} = \frac{\rho_p}{\rho_{15}}$$

ρ_p : 실험온도에서의 물의 밀도(kg/m³)

ρ_{15} : 15 °C에서의 물의 밀도(kg/m³)

압력에 의한 재질의 부피변화 보정계수

$$C_{psp} = 1 + \frac{P_p \times D}{E \times t}$$

P_p : 파이프 프루버의 실험압력(bar)

D : 파이프 프루버 내경(mm)

t : 파이프 프루버 배관 두께(mm)

E : 재질의 종단성계수 (2 059 380 bar)

압력에 의한 액체의 부피변화 보정계수

$$C_{pl} = \frac{1}{1 - P_p \times \beta}$$

β : 압력에 따른 유체부피 압축율

(4.5 × 10⁻⁵/bar)

유량계의 측정특성을 나타내기 위하여 유량계의 오차를

구하였는데 식 (8)과 같이 유량계의 부피(V_m)과 파이프 프루버 부피(V_p)의 차를 파이프 프루버 부피에 대한 백분율로 계산하였다.

$$\text{Error}(\%) = \frac{V_m - V_p}{V_p} \times 100 \quad (8)$$

Fig. 8과 같이 고정된 설치조건에서 유량계를 실험하는 경우 유입되는 유동의 형태, 설치형태, 후단 압력 등에 의한 영향은 무시할 수 있고 레이놀즈수에 따라 유량계의 측정특성이 달라지는 것으로 알려져 있었다.

Fig. 9의 (a)는 터빈유량계 1번, (b)는 터빈유량계 2번의 6°C에서 90°C까지의 실험결과를 레이놀즈수에 따른 유량계 오차로 표시한 것이다. 실험은 레이놀즈수 3.8 × 10⁵부터 6.4 × 10⁶ 사이에서 이루어졌다. 실험결과 동일한 레이놀즈수 영역일지라도 실험온도에 따라 오차의 차이가 발생하였으며 특히 터빈 유량계 1번(TB 1)과 터빈유량계 2번(TB 2)에서 온도 20°C와 90°C 일 때 레이놀즈수가 유사하여도 오차의 차이가 더욱 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이 결과는 레이놀즈수 외에 온도가 터빈유량계 측정특성에 영향을 주고 있다는 것을 말하고 있다.

Fig. 10의 (a)는 터빈유량계 1번, (b)는 터빈유량계 2번의 유량실험 결과이다. 가로축은 유량, 세로축은 터빈유량계의 오차를 나타내고 있다. 400, 800, 1 200, 1 500 m³/h의 각 유량에서 실시한 3회 실험결과와 오차를 평균하여 동일 온도로 연결하여 표시한 것이다.

일반적으로 상온이라 할 수 있는 30°C 이하에서는 온도상승에 따라 오차가 (-)로 이동하고 있지만 유량에 따른 오차

변화가 크지 않고 0.1% 이내로 나타나고 있다. 정밀급 터빈 유량계의 정확도가 $\pm 0.15\%$ 이므로 정확도 범위 내에서 변화를 보이고 있다. 그러나 40°C 이상이 되면 유량측정특성 곡선이 변하기 시작하여 온도가 상승할수록 유량에 따라 오차 변화가 크게 나타난다. 특히 온도가 가장 높은 90°C 의 실험 결과는 상온의 결과와 최대 0.4%의 차이가 발생하였다.

동일 유량에서 온도가 상승할수록 지연 토크가 증가하게 되며 이것은 식 (3)에 따라 터빈 날개출구 유속 \bar{V}_2 의 접선 방향성분인 \bar{V}_{t2} 의 크기가 커지게 되고 $\Delta\bar{U} = \eta\bar{V}_{t2}$ 인 관계에 의해 터빈날개 속도 손실인 $\Delta\bar{U}$ 도 증가하여 식 (4)에서 보는 것처럼 터빈 날개의 속도($\bar{r}\omega$)가 감소하게 된다. 터빈날개의 속도가 감소하면 식 (8)에 의해 오차는 (-)로 감소하는 것이다. 상대적으로 유량이 증가할수록 온도변화에 따른 오차의 변화가 적은 것은 지연 토크가 증가하더라도 질량유량(ρQ)이 커져서 낮은 유량에 비해 \bar{V}_{t2} 의 증가가 상대적으로 작게 나타나기 때문이다. Fig. 9에서 동일한 레이놀즈수 영역이어도 온도가 90°C 이고 유량이 $400\text{ m}^3/\text{h}$ 일 때 오차가 가장 크게 변한 이유는 지연 토크가 가장 크고 질량유량은 가장 작아서 속도손실 값이 가장 커지기 때문이다.

따라서 본 연구에서 확인한 것처럼 터빈유량계의 측정특성을 정확히 파악하기 위해서는 기존 연구를 통해 알려진 배관조건, 후단압력, 레이놀즈수 뿐 아니라 온도에 따른 영향도 함께 고려하여야 한다.

4. 결론

본 연구를 통해 터빈유량계는 배관조건, 후단압력, 레이놀즈수 뿐 아니라 온도에 의해서도 측정특성이 변하는 것을 실험적으로 확인하였다.

- 1) 터빈유량계의 실험을 통해 동일 유량에서 온도에 따라 최대 0.4%의 편차가 발생하는 것을 확인하였다. 유체의 온도가 올라가면 지연 토크가 커져서 터빈날개 속도

손실이 증가하며 날개의 회전이 감소하여 측정오차가 마이너스 방향으로 이동한다.

- 2) 터빈유량계는 유량이 증가할수록 출구유속 접선성분의 증가율이 작아져 낮은 유량에 비해 상대적으로 지연 토크의 영향을 적게 받아 낮은 온도보다 높은 온도에서 오차곡선의 기울기가 커진다.
- 3) 이러한 결과를 통해 적산열량계, 온수미터 등으로 사용되는 터빈유량계는 실사용 조건과 유사한 온도에서 교정해야 함을 알 수 있다.

References

- (1) API Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 5, 2000, "Section 3-Measurement of Liquid Hydrocarbons by Turbine meter".
- (2) Lee, W. F. Z. and Evans, H. J., 1965, "Density Effect and Reynolds Number Effect on Gas Turbine Flowmeters," Journal of Basic Engineering.
- (3) Montgomery R. Shafer, 1962, "Performance Characteristics of Turbine Flowmeters," Journal of Basic Engineering.
- (4) Lim, K. W., 2008, "Intercomparison of Light Oil flow Standard System for the Reliability of Measurement Accuracy," Journal of KSME(B), Vol. 32, No. 12, pp. 712~719.
- (5) Kim, J. B. and Ko, S., 2003, "Numerical Study of Three-Dimensional Flow Through a Turbine Flow Meter", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 6, No. 1, pp. 44~50.
- (6) API Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 4, 1995, "Section 8-Operation of Proving system".
- (7) ISO 4185, 1980, "Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits - Weighing method".
- (8) ASME PTC 6, 2004, "Steam Turbines".