

액체용 중량식 유량계 교정장치의 일방향 Diverter 특성연구

남기한* · 박종호** · 김홍집** †

Characteristics of Uni-directional Diverter for Gravimetric Calibration Facility

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

Key Words : Filling Time(수집시간), Jet Velocity Distribution(노즐에서 분출되는 유속분포), Trigger Location(시간측정 위치), Uni-directional Diverter(일방향 디버터)

ABSTRACT

Diverter is an essential element in gravimetric calibration method of flowmeter. Error of diverter are influenced by flow velocity profile of nozzle outlet, motion velocity of diverter and detecting location. That's why, time detection position of diverter is tuned through repetitive test for minimizing error of diverter. Further the diverter must be compared with the other institutions test since the influence on the accuracy of the flow meter used in the test. In this paper, errors (flow velocity profile of nozzle outlet, motion velocity of diverter and detecting location) of diverter are decreased by produced uni-direction diverter and error of gravimetric calibration system is decreased. Uni-direction diverter is calibrated by gravimetric calibration system with precision flowmeter, the flowmeter is calibrated by pipe prover and other institutions and uni-direction diverter is evaluated. Uni-direction diverter is not influenced by flow velocity profile of nozzle outlet, motion velocity of diverter and detecting location. As a result, Uni-direction diverter can calibrate in wider scope since increasing ratio of maximum and minimum flow rate of uni-direction diverter.

1. 서 론

유량계는 배관 내부를 흐르는 다양한 유체의 양을 측정하는 기기로 거래 또는 측정에 사용하는 장치이므로 사용 전에 형식 및 사용목적에 따라 적합한 교정장치를 선택하여 교정을 한다. 액체용 유량계의 교정장치 가운데 중량식 유량계 교정장치는 질량유동율 또는 부피유동율을 측정할 때 널리 사용하고 있다. 중량식 유량계 교정장치는 구조 및 측정원리에 대해서 규격화⁽¹⁾되어 있어 국제규격에 따른 국내의 국제공인 교정기관들은 규모만 다를 뿐 대부분 동일한 구조의 장치를 사용하고 있다.⁽²⁾ 유량이 큰 경우 다른 교정장치에 비해 규모가 크고 장치가 복잡하여 설치 및 사용에 많은 주의가 필요로 한다.

중량식 교정장치는 유량계를 통과한 물을 수집탱크 또는 회수탱크로 보내는 디버터, 물을 수집하는 수집탱크, 수집탱크에 수집된 물의 무게를 측정하는 저울로 구성되어 있다. 중량식 유량계 교정장치의 측정정확도에 대표적으로 영향을 주는 것은 디버터와 저울이다. 저울은 교정을 통해 오차를 줄일 수 있으며 일반적으로 0.02% 이내의 오차를 가지게 된다. 디버터의 경우 기존 방식인 스윙식(swing type)은 동작속도, 시간측정 위치, 그리고 노즐에서 분출되는 유속분포의 불균일성 등으로 오차가 발생한다. 국내의 경우 디버터의 문제를 해결하기 위한 연구가 활발하지 않으며 ISO 4185에서 제시한 전형적인 스윙식 디버터를 사용하여 반복적인 유량시험을 통해 동작속도와 시간측정 위치를 조정하여 오차를 줄이고 불확도를 평가한 결과가 보고된 예가 있

* (주) 우진(WOOJIN INC.)

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

† 교신저자, E-mail : khongjip@cnu.ac.kr

다.⁽³⁾ 해외의 경우 독일의 국가표준기관인 PTB에서는 노즐에서 분출되는 유속분포를 균일하게 만들기 위한 노즐의 형상설계와 노즐의 출구를 가변형태로 만들어 유량에 따라 노즐간격을 조절할 수 있도록 하여 스윙식 디버터의 단점을 보완하고 불확도를 낮추고자 하는 연구가 진행되었다.⁽⁴⁾ 일본에서는 일방향 디버터를 고안하여 오차를 줄이고 불확도를 낮추는 연구를 진행하였는데 노즐에서 분출되는 물을 수집탱크 또는 저수조로 보내는 장치를 두 가지 형태로 고안하여 사용하고 있다.

- (1) 고정된 노즐의 하부장치가 바이패스-수집-바이패스로 수평이동 하여 수집과 파이패스가 동일한 방향이 되도록 한 구조⁽⁵⁾
- (2) 고정된 노즐의 하부장치를 회전형으로 제작하여 수집과 바이패스가 동일한 방향이 되도록 한 구조⁽⁶⁾

본 연구에서는 스윙식 디버터의 단점을 제거하고 오차를 줄이기 위한 일방향 디버터의 형태를 제시하고자 한다.

수집과 바이패스(by-pass) 동작이 서로 반대방향인 스윙식과 달리 수집과 바이패스가 같은 방향으로 동작하는 일방향 디버터를 제작하여 다른 교정장치와의 비교시험을 통해 그 성능을 확인하였다. 비교시험에는 부피식 교정장치인 파이프 프루버(pipe prover)와 타 기관의 중량식 교정장치를 이용하였으며 시료 유량계는 오차와 재현성이 좋은 코리올리 질량유량계와 터빈유량계를 사용하였다.

2. 중량식 유량계 교정장치

2.1 구조 및 원리

Fig. 1은 중량식 유량계 교정장치의 일반적인 형태로 저울, 수집탱크, 디버터, 시험배관, 유동발생장치인 펌프, 저수조로 구성되어 있다. 펌프를 사용하여 저수조의 물을 순환시키며 유량계를 통과한 물은 디버터에 의해 수집탱크 또는 저수조로 선택적으로 흐르게 된다. Fig. 2는 스윙식 디버터의 일반적인 구조를 보여주고 있다. 준비상태에서는 물이 저수조로 바이패스(by-pass) 되다가 교정이 시작되면 순간적으로 디버터가 동작하여 물을 수집탱크로 흘리게 되며 동시에 유량계 출력 펄스의 수집을 시작한다. 설정한 시간 또는 수집량이 되면 디버터가 동작하여 저수조로 바이패스 되며 동시에 유량계의 펄스 수집을 멈춘다. 저울에 표시된 양과 유량계의 표시값을 비교하여 유량계의 오차를 계산하는 방법으로 교정을 한다.

Fig. 3은 디버터가 수집 또는 바이패스 위치로 동작할 때 수집탱크로 유입되는 유동을 곡선과 구간별 시간을 보여주고 있다. 중량식 교정장치로 유량계를 1회 교정하는 전체시

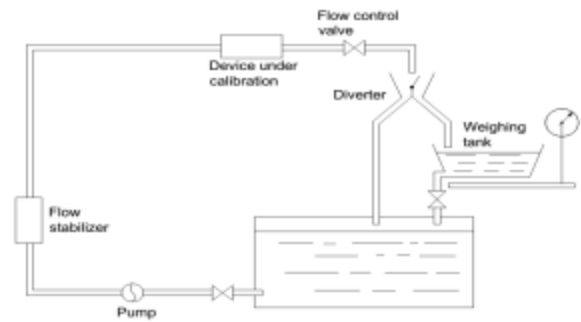


Fig. 1 Schematic diagram of gravimetric flowmeter calibration system

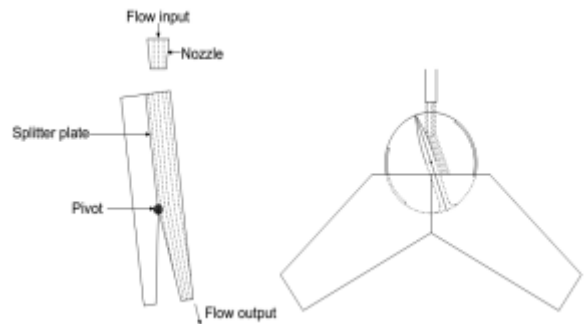


Fig. 2 Examples of diverter design

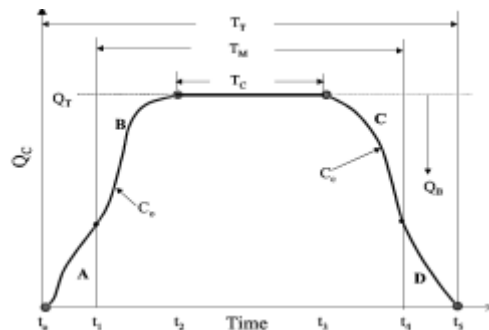


Fig. 3 Liquid flow collected as function of time

간(T_T)은 수집동작구간($t_0 \leq t \leq t_2$), 수집구간($t_2 < t < t_3$), 바이패스동작구간($t_3 \leq t \leq t_5$)으로 나눌 수 있다. 이 때 탱크로 들어가는 유량(Q_C)은 수집동작구간에서는 증가하고 바이패스동작구간에서는 감소하며, 바이패스 유량(Q_B)은 반대의 경향을 보인다. 따라서 시험유량(Q_T)은 수집탱크로 수집되는 유량(Q_C)과 바이패스 유량(Q_B)의 합으로 나타낼 수 있다 ($Q_T = Q_C + Q_B$).

Fig. 3에서 A와 D는 유량계의 펄스를 수집하는 측정시간(T_M) 외의 구간에서 수집탱크에 수집된 부피를 나타내며 B와 C는 측정시간 내에 바이패스 된 부피를 나타낸다. 따라서 $A+D=B+C$ 인 경우에는 디버터의 오차가 전혀 없게 된다. 그러나 디버터 동작속도와 노즐에서 분출되는 유속분포에 따라 수집 시의 유량곡선(C_O)과 바이패스 시의 유량곡선(C_B)

Table 1 Test results of coriolis mass flowmeter

Case	Concept works
a	the diverter valve moves at a constant velocity, and the jet flow profile is uniformly distributed
b	the diverter valve moves at a constant velocity, and the jet flow velocity increases linearly with distance x
c	the diverter valve moves at a constant velocity, and the jet flow velocity decreases linearly with distance x
d	the diverter valve speed increases linearly with time (constant acceleration) and the jet flow profile is uniformly distributed
e	the diverter valve speed increases linearly with time, and the jet flow velocity increases linearly with distance x
f	the diverter valve speed increases linearly with time, and the jet flow velocity decreases linearly with distance x

이 일치하지 않는다.

2002년 미국의 국가표준기관인 NIST와 남아공의 국가표준기관인 CSIR가 공동으로 스윙식 디버터를 사용하는 중에 발생할 수 있는 여러 가지 오차요인을 분석하고 이러한 오차요인을 제거할 수 있는 대안을 제시하였다.⁽⁷⁾ Table 1은 참고문헌 (7)에서 언급한 내용으로 스윙식 디버터를 사용하는 경우에 나타날 수 있는 디버터의 동작속도와 노즐에서 분출되는 유속분포의 사례들이 나타나 있다. 각 사례에 따른 유량곡선은 Fig. 4와 같으며 노즐에서 분출되는 유속분포가 균일하고 디버터의 동작 속도가 일정한 사례 a를 제외하고는 수집 시의 유량곡선(C_0)과 바이패스 시의 유량곡선(C_c)의 형태가 다르게 나타나고 있다. 따라서 Case a의 경우 시간측정 위치를 조정하여 측정시간(T_M)을 변경하면 $A+D=B+C$ 가 될 수 있는 구간을 찾을 수 있다. 그러나 현실적으로 스윙식 디버터의 동작속도가 일정하지 않고 노즐에서 분출되는 유속분포도 대칭형태가 아니기 때문에 $A+D \neq B+C$ 가 되며 디버터에 의한 오차가 발생하게 된다.

2.2 스윙식 디버터의 유량시험

스윙식 디버터는 구조적으로 오차가 발생할 수 밖에 없지만 최소화하기 위한 방법이 제시되어 있다.⁽¹⁾ 디버터의 동작 시험을 통해 시간오차(Δt)를 줄이는 방법이다. 이 시험에는 성능이 우수한 유량계를 사용하여야 한다.

중량식 교정장치의 최대유량에서 디버터를 사용하여 수집 탱크를 가득 채우는 시간을 기준시간으로 하여 기준시간의 20%, 10%, 5%의 시간에서 시험을 실시한다.

시험결과를 이용하여 식 (1)에 따라 시간오차를 구할 수 있다.

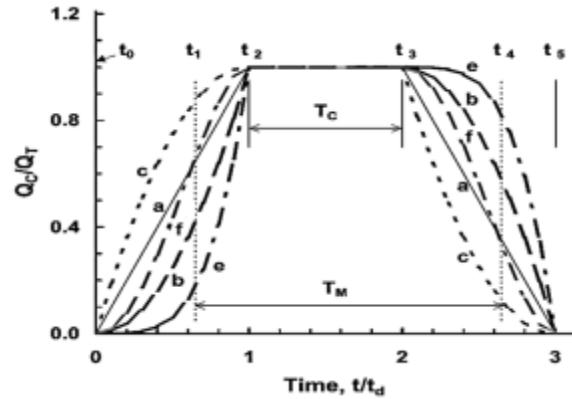


Fig. 4 The collection flow as function of time for the six example

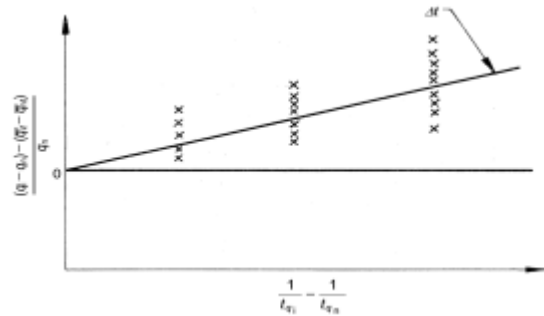


Fig. 5 Plotting of results of diverter timer (Swing Type)

$$\Delta t \left(\frac{1}{t_{qi}} - \frac{1}{t_{qn}} \right) = \frac{(q_i - q_n) - (\bar{q} - \bar{q}_{nt})}{q_n} \quad (1)$$

- 여기서 t_{qi} : 짧은 수집시간
- t_{qn} : 기준 수집시간
- q_i : 짧은 수집시간동안의 계산된 유량
- q_n : 기준 수집시간동안의 계산된 유량
- \bar{q} : 짧은 수집시간동안의 유량계 평균유량
- \bar{q}_{nt} : 기준 수집시간동안의 유량계 평균유량

시간오차(Δt)를 도식화하면 Fig. 5와 같이 기울기로 표시 되는데 반복시험을 통해 디버터의 동작속도와 시간측정 위치를 조정하며 기울기를 가급적 가로축과 수평이 되도록 하여 사용하고 있다. 그러나 이와 같은 조정을 하더라도 시험에 사용된 유량계의 정확도와 성능에도 영향을 받게 된다.

3. 일방향 디버터 측정원리

참고문헌 (7)에는 오차가 없는 일방향 디버터의 여러 가지 동작원리가 제시되어 있다. 일방향 디버터는 기존의 스윙식 디버터와 달리 시간측정 위치, 디버터의 동작속도, 노즐에서 분출되는 유속분포의 형태에 영향을 받지 않아 오차를 고려하지 않고 사용할 수 있는 형태이다. Fig. 6에 예시가 있는

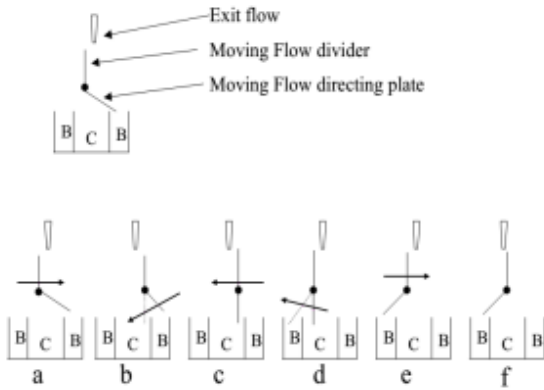


Fig. 6 Example of uni-directional diverter

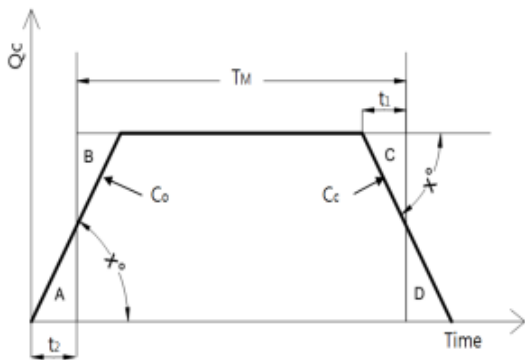


Fig. 7 Liquid flow collected as function of time for uni-directional diverter

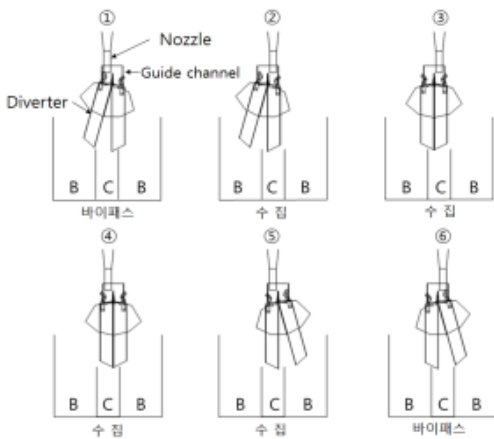


Fig. 8 Uni-directional diverter for gravimetric facility

데 수집동작과 바이패스 동작이 서로 반대인 기존의 스윙식 디버터와는 달리 수집동작과 바이패스 동작이 같은 방향으로 이루어지고 있다. 수집과 바이패스 동작이 같은 방향으로 이루어지고 있기 때문에 Fig. 7에서 t_1 과 t_2 의 시간이 동일하여 시간측정 위치가 같고 수집 시의 유량곡선(C_b)과 바이패스 시의 유량곡선(C_c) 각도가 같은 값(x°)을 가진다. 따라서 부피 A와 부피 C가 같고 부피 B와 부피 D도 같기 때문에 $A+D=B+C$ 가 항상 성립하여 오차가 발생하지 않는 것이다.



Fig. 9 Photograph of gravimetric calibration facility

일방향 디버터는 기존 스윙식 디버터에서 필요했던 디버터 동작속도와 시간측정 위치의 조정이 필요 없고 장기간 사용에 따른 변화에도 영향을 받지 않는다.

4. 일방향 디버터의 제작 및 성능평가

4.1 일방향 디버터의 설계 및 제작

중량식 교정장치를 보유하고 있는 국내의 모든 기관들은 스윙식 디버터를 사용하고 있으며 일방향 디버터에 대한 연구가 진행되지 않았다. 그러나 일본에서는 이미 국가표준기관인 계량표준종합센터에서 일방향 디버터에 관한 연구결과를 발표하였으며 현재까지 사용하고 있다. 참고 문헌 (7)에 기술되어 있는 것처럼 일방향 디버터는 다양한 형태로 설계할 수 있으며 본 연구에서는 국내 최초로 새로운 형태의 일방향 디버터를 설계·제작하여 유량시험을 통해 성능을 평가하였다. 새로운 형태의 일방향 디버터의 동작형태는 Fig. 8과 같으며 동작순서는 아래와 같이 왕복하며 사용하도록 설계되었다.

- ① 바이패스 → ② 수집 → ③ 수집 → ④ 수집
- ⑤ 수집 → ⑥ 바이패스 → ⑤ 수집 → ④ 수집
- ③ 수집 → ② 수집 → ① 바이패스

① 바이패스에서 ② 수집으로 동작할 때 가이드 채널 (guide channel)이 왼쪽으로 움직이고 ⑤ 수집에서 ⑥ 바이패스로 동작할 때도 가이드 채널이 왼쪽으로 움직여 시작과 끝의 동작방향이 동일한 일방향 디버터이다. 일방향 디버터는 제작 후 디버터의 동작속도나 시간측정 위치의 조정을 거치지 않고 사용하였으므로 시험에 사용하는 유량계의 성능에 따른 영향도 받지 않는 장점도 있다. 가이드 채널과 디버터의 구동은 유공압 장치를 사용하였다. Fig. 9는 시험에 사용한 디버터 및 중량식 교정장치이다.

Table 2 Test results of coriolis mass flowmeter

Flowrate (m ³ /h)	Other's gravimetric facility		WOOJIN's gravimetric facility		En
	Error (%)	Uncertainty (%)	Error (%)	Uncertainty (%)	
40	0.22	0.07	0.21	0.10	0.08
80	0.23	0.06	0.24	0.08	0.10
120	0.23	0.06	0.26	0.09	0.28
160	0.23	0.06	0.27	0.09	0.37
200	0.21	0.07	0.23	0.08	0.19

4.2 유량시험

일방향 디버터는 기존의 스윙식 디버터처럼 사용 전에 시 간오차(Δt) 보정을 시험을 실시하지 않고 설치 후 그대로 유 량시험에 사용하였으며 두 가지 방법으로 진행되었다.

첫 번째는 일방향 디버터가 설치된 50 ton 중량식 교정 장치에서 1대의 100 mm 코리올리 질량유량계를 교정하고 동일한 유량계를 표준과학연구원의 중량식 교정장치에서 교 정하여 두 결과를 비교하였다. 코리올리 질량유량계는 유량 계가 설치된 전·후단 배관형상에 의해 측정특성이 영향을 받지 않기 때문에 시험장소 변경에 대한 영향을 배제할 수 있다.

두 번째는 부피식 교정장치인 파이프 푸루버를 사용하여 2대의 250 mm 터빈유량계를 교정하고 동일한 유량계를 일 방향 디버터가 설치된 50 ton 중량식 교정장치에서 교정하 여 두 결과를 비교하였다. 파이프 푸루버는 유체종류 및 유 량에 영향을 받지 않는 특성을 가지고 있어 유량계의 교정에 널리 쓰이는 장치이다.⁽⁸⁾

터빈 유량계는 유량계가 설치된 전후단 배관형상에 의해 측정특성이 영향을 받지만 이번 시험에서는 터빈유량계가 동일한 장소에 설치된 상태에서 부피식 교정장치와 중량식 교정장치를 사용하여 교정하였으므로 영향을 받지 않았다.

3대의 시료 유량계를 일방향 디버터가 설치된 50 ton 중 량식 교정장치로 교정한 결과와 보유중인 부피식 교정장치, 그리고 표준과학연구원의 중량식 교정장치로 교정한 결과를 비교함으로써 일방향 디버터의 성능을 평가하였다.

4.3 시험결과 분석

기준설비와 평가대상설비로 각각 교정한 유량계의 오차와 측정불확도를 이용하여 En 값을 계산함으로써 일방향 디버 터의 성능을 평가하였다. 이 En 값은 적합성 평가의 숙련도 시험 일반 요구 사항에 언급되어 있고, 교정설비의 측정능력 을 평가하는 방법으로 국제적으로 널리 사용하고 있으며 식 (2)와 같이 정의된다.⁽⁹⁾ 식(2)에서 유량계의 측정불확도 U_{lab}

Table 3 Test results of turbine flowmeter #1

Flowrate (m ³ /h)	WOOJIN's volumetric facility		WOOJIN's gravimetric facility		En
	Error (%)	Uncertainty (%)	Error (%)	Uncertainty (%)	
200	0.04	0.05	0.01	0.08	0.32
400	-0.03	0.05	-0.03	0.09	0.00
800	-0.01	0.05	-0.01	0.08	0.00
1200	-0.01	0.05	-0.06	0.09	0.49

Table 4 Test results of turbine flowmeter #2

Flowrate (m ³ /h)	WOOJIN's volumetric facility		WOOJIN's gravimetric facility		En
	Error (%)	Uncertainty (%)	Error (%)	Uncertainty (%)	
200	0.00	0.05	0.00	0.08	0.00
400	0.00	0.05	-0.06	0.08	0.64
800	0.01	0.05	-0.01	0.08	0.21
1200	0.01	0.05	0.03	0.08	0.21

와 U_{ref} 는 유량계 교정에 사용한 설비의 불확도, 유량계의 반복오차에 의한 불확도, 유량계의 분해능에 의한 불확도가 포함되며 참고문헌 (10)에 따라 계산하였다.

$$E_n = \frac{x_{lab} - x_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (2)$$

여기서 x_{lab} : 평가대상설비로 교정한 유량계의 오차

x_{ref} : 기준설비로 교정한 유량계의 오차

U_{lab} : 평가대상설비로 교정한 유량계의 측정불확도

U_{ref} : 기준설비로 교정한 유량계의 측정불확도

참고문헌 (9)에 따르면 $|E_n| \leq 1$ 이면 평가대상이 되는 설비 의 측정능력이 만족스럽다는 것을 의미하고 $|E_n| > 1$ 이면 평 가대상이 되는 설비의 측정능력에 문제가 있음을 의미하며 시정조치가 필요하다는 것을 의미한다.

Table 2에는 코리올리 질량유량계를 이용한 비교시험결과 가 나타나 있다. En 값을 보면 모두 1 이내에 있는 것을 알 수 있다. 이것은 아무런 보정작업도 하지 않은 일방향 디버 터를 사용한 중량식 교정장치의 오차가 충분히 작음을 의미 한다. 또한 Table 3과 4에는 부피식 교정장치와 비교한 결과 가 나타나 있다. 터빈유량계는 부피를 측정하기 때문에 중량 식 교정장치로 측정된 양을 측정온도의 물 밀도로 나누어 부 피로 환산 후 비교하였다. 표준과학연구원의 중량식 교정장 치와 비교한 결과와 마찬가지로 부피식 교정장치로 비교한 결과도 En 값이 모두 1 이내인 것을 확인하였다.

두 가지의 서로 다른 형태의 비교시험을 통해 일방향 디버

터가 디버터의 속도나 노즐에서 분출되는 유속분포, 시간측정 위치 등에 영향을 받지 않는 것을 알 수 있었다. 또한 일방향 디버터가 설치된 중량식 교정장치의 사용범위가 최소 40 m³/h에서 최대 1200 m³/h로 기존 스윙식 디버터의 사용범위보다 3배 이상 넓은 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 일방향 디버터는 디버터의 속도변화, 노즐에서 유출되는 유속분포의 형태, 시간측정 위치에 영향을 받지 않는다.
- 2) 일방향 디버터의 유량비가 1:30의 범위까지 사용할 수 있어 기존의 스윙식 디버터보다 더 넓은 범위에서 유량계 교정에 사용할 수 있다.
- 3) 기존 디버터는 유량계를 사용하여 시험하기 때문에 유량계의 오차에 영향을 받지만 일방향 디버터는 유량계를 사용하지 않아도 된다.

References

- (1) ISO 4185, 1980, "Measurement of liquid flow in closed conduits - Weighing method".
- (2) ISO/IEC 17025, 2005, "General requirements for the competence of testing and calibration laboratory".
- (3) Lee, D. K. and Park, J. H., 2008, "Uncertainty Characteristics of Diverter for Flowmeter Calibration System," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 11, No. 3, pp. 50~55.
- (4) Engel, R. and Klages, U., 2000, "A Novel Approach to Improve Diverter Performance in Liquid Flow Calibration Facilities," FLOMEKO 2000 Conference.
- (5) Shimada, T., Oda, S., and Takamoto, M., 2001, "A Novel Diverter For Liquid Flow Calibration Facilities," NCSL International Workshop & Symposium.
- (6) Doihara, R., Shimada, T., Terao, Y., and Takamoto, M., 2006, "Development of Weighing Tank System Employing Rotating Double Wing Diverter," Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 17, No. 3, pp. 141~152.
- (7) Yeh, T. T., Yende, N. P., Johnson, A., and Espina, P. L., 2002, "Error Free Liquid Flow Diverters for Calibration Facilities," FEDSM2002-31085, pp. 141~148.
- (8) Nam, K. H., Park, Y. C., and Park, J. H., 2013, "Impact of Yearly Drift on the Measurement Uncertainty of Pipe Prover," KSME Conference.
- (9) ISO/IEC 17043, 2010, "Conformity Assessment -General Requirements for Proficiency Testing - Annex B Statistical Methods for Proficiency Testing".
- (10) ISO/IEC GUIDE 98-3, 2008, "Uncertainty of Measurement - Part 3:Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement".