

유량측정 오차에 미치는 유동조건의 영향 검출방법연구

An Identification Method of the Influence of Flow Conditions on the Flow Metering Error

이 광 복*, 최 해 만*, 백 중 승*
K. B. Lee, H. M. Choi, J. S. Paik

ABSTRACT

The effect of flow conditions on flow measurement is difficult to identify from the inherent characteristics of the flowmeters and flow standard system. A new experimental approach has been attempted to detect the turbine meter error due to inlet flow conditions. In this try not only the design of the turbine meter package but also the data analysis method was altered. It was found that k factor slope of the turbine meter responds to the change of flow conditions in the test line with higher sensitivity than the degree of the data scattering. The flow standard system of $0.1\text{m}^3/\text{s}$ was chosen for the investigation. The systematic and random error of the system were less than $\pm 0.08\%$ and $\pm 0.13\%$ respectively.

1. 서 론

가장 전통적인 파이프 유량 측정 방법은 유동 상태의 유체와 유동장 내에 설치된 기계 장치가 상호 작용할 때 발생하는 유체 역학적인 현상을 관찰하는 것이다. 그리고 최근에는 초음파 빔, 레이저 빔 등을 유동장 내부의 입자 혹은 난류와 작용시킬 때 발생하는 주파수 변조 정도를 측정하여 평균 유속을 결정하는 방법이 개발되어 널리 활용되고 있다. 모든 경우 유량 측정결과는 파이프 내부를 흐르는 유체의 유동 안정도, 유동율, 유동속도 분포 등 유동 특성변화에 따른 영향을 피할 수 없다. 특히 산업체에서 널리 사용되고 있는 유

량계들중 오리피스, 벤추리유량계 등의 차압식 유량계, 터빈 미터, 와 유량계(vortex flowmeter), 초음파 유량계는 파이프 유동특성 변화에 민감하게 반응한다.¹⁾ 따라서 이들 유량계를 교정대상으로 하는 유량표준 시스템의 유동특성을 분석 규명하고, 유량측정 결과에 대한 영향을 정량화 하는 연구는 유량 측정 정확도 향상과 측정 결과에 대한 신뢰성을 확보하는데 매우 중요하다.

미국의 연방 표준국인 NBS(현재 국립표준 기술연구소, NIST)에서는 액체 유량 표준 시스템들간의 정확도 비교실험 과정에서 두조의 터빈 미터를 직렬로 연결하여 구성한 터빈 미터 package의 사용을 최초로 제안하였다.²⁾

* 한국표준연구소

이때 각 터빈미터의 상류측에 튜브벤들형의 **straightening vane** 을 설치하여 실험관로의 유동특성이 실험결과에 미치는 영향을 배제한 후 시스템 고유오차만을 규명하고자 하였다. 그리고 비교 실험 결과는 Youden의 **graphic analysis** 방법³⁾으로 분석하였다.

그후 영국의 국립공학연구소인 NEL 에서는 NBS의 터빈 미터 **package** 와 구성이 다른 **package** 를 이용하여 독일 연방물리기술청 (PTB)의 유량 표준 시스템과 상호 비교 실험을 실시하였다.⁴⁾ 즉 터빈 미터 **package** 구성시 **straightening vane** 을 **package** 의 하류측 미터에만 설치하여 줌으로써 하류측 미터 특성이 상류에 설치된 미터 때문에 발생하는 교란의 영향을 받지 않게 하면서 상류쪽의 미터는 실험관로의 유동장의 교란변화에 노출시킨 상태에서 유량측정을 실시하였다. 그리고 상류측 미터의 유량측정 결과를 하류측 미터의 유량측정 결과와 비교하여 시험관로 유동특성이 유량측정 정확도에 미치는 영향을 규명하였다. 이때 두 유량계의 고유특성 차이때문에 발생하는 오차요인을 배제하기 위해 유량계의 위치를 바꾸어 실험을 되풀이 하였다. 그러나 Youden **graphic analysis** 방법으로 제한된 유동을 범위에서 실시하여 얻은 실험결과를 분석하는 것만으로는 시스템 유동 특성에 의한 영향을 유량계 특성에 의한 영향과 구별하기 어려웠고, **flow straightening vane** 이 상류측 터빈미터가 발생하는 유동장 교란의 영향으로부터 하류측의 터빈미터를 격리하는 역할을 할뿐 하류측 미터가 이상적인 유동상태인 완전하게 발달한 파이프 난류유속분포 상태에서 유량측정을 했다는 보장을 할 수 없었다.⁵⁾

본 연구에서는 기존의 터빈미터 **package** 구성을 변경하고, 실험방법과 실험결과의 해석과정에서 새로운 지표표를 도입하였다. 그 결과 실험관로 내의 유동장 교란이 유량계 특성에 미치는 영향을 Youden의 **graphic analysis** 방법보다 민감하게 감지할 수 있었다. 그리고 터빈미터의 특성변화에 실험관로 유동 특성이 미치는 영향을 규명하는데 적용해 본 결과 이 개선된

방법이 실험관로의 유동특성 때문에 발생하는 오차요인을 터빈미터 자체가 가지는 오차요인이나 시스템 고유의 오차요인으로부터 구별하는데 매우 효과적임을 발견하였다. 실험대상으로는 한국표준연구소에서 보유하고 있는 액체 유량표준 시스템 중 차압식 유량계, 터빈미터 등 표준 시스템의 유동특성 변화에 민감한 유량계들을 주로 교정대상으로 하는 0.1 m³/s 용량의 증량식 액체 유량표준 시스템을 선정하였다.

2. 실험방법 및 결과

증량식 액체유량 표준 시스템에서 표준질량 유동율은 일정한 시간동안 수집되는 액체의 중량을 측정하여 결정한다. 그러므로 중량측정 오차와 시간측정오차는 시스템의 최종오차에 영향을 미친다. 따라서 1차적으로 Fig.1과 같은 0.1m³/s 용량의 액체 유량표준 시스템^{6,7)}의 중량측정 장치와 수집시간 측정오차를 유발하는 유동 방향전환 장치의 성능평가 실험을 실시하여 고유 오차 크기를 산정하였다. 다음에는 **pitot tube** 실험 및 한국표준연구소에서 개선한 터빈미터 **package** 와 데이터 분석 방법을 사용하여 실험관로에서의 유속분포와 교란이 터빈미터를 사용한 유량측정 결과에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.

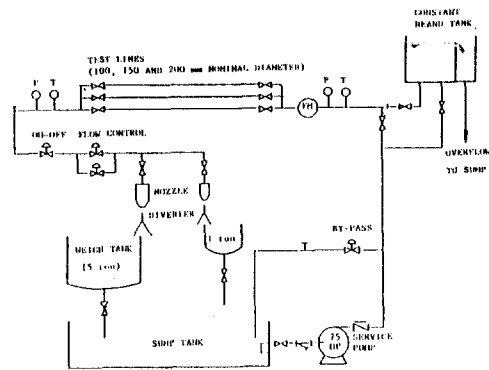


Fig.1 Schematic layout of liquid flow standard system

2.1 시스템 고유오차 실험

(1) 중량 측정오차

5t 중량 측정장치를 물 치환방식(water replacement method)으로 최대 용량까지 교정한 후 그 결과를 실하중 방식에 의한 교정 결과와 비교하였다(Fig. 2). 실하중 방식에 의한 교정 결과가 교정 시기를 각각 7월과 11월로 하여 실시한 두 차례의 물 치환실험결과와 잘 일치하고 있으며 3t 이상의 물을 수집할 때의 중량 측정오차는 0.02%를 넘지 않았다. 이때 중량 측정 시스템의 지시계 분해능은 50g 이고, 교정과정에서 사용한 표준추의 오차는 0.0005% 이내였다. 1t 중량 측정장치의 경우에는 지시계 분해능을 10g으로 하여 실하중 방식에 의해 교정하였는데 500kg 이상의 물을 수집하여 측정할 때 오차가 0.025%를 넘지 않았다.

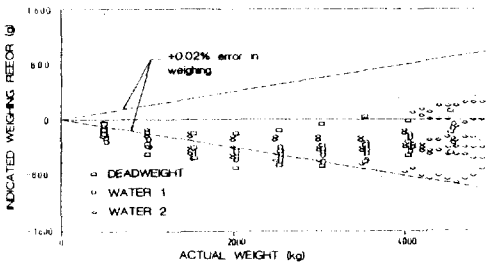


Fig.2 Calibration of 5t weighing machine

(2) 유동 방향전환 오차

물 수집시간 측정에 사용한 타이머의 자체 오차는 수정 진동자의 안정도와 지시계의 분해능이 1ms 인 점을 감안할 때 국가 표준 주파수로 교정한 후 20s 이상의 시간 측정에 사용하는 경우 측정 오차를 0.05% 이내로 억제할 수 있다. 따라서 수집시간 측정 정확도에 결정적인 영향을 미치는 오차요인은 유동 방향전환 밸브의 성능이다.⁸⁾

유동 방향전환 밸브의 성능 평가는 방향전환 밸브에 장착된 타이머 작동 스위치가 노출에서 분사되는 얇은 물판 중심에서 동작하도록 그 위치를 미세 조정된 후 ISO 4185-1980⁸⁾에서 제시한 방법에 따라 실시하였다. 이 방

법은 우선 유동방향전환 밸브를 1회 작동시켜 수집 측정된 물의 질량값과 수집시간을 근거로 유동율을 결정한다. 다음에는 물을 수집하는 동안 유동 방향전환 밸브를 20회 작동하여 불연속적으로 물을 수집한 후 합계한 수집 시간과 수집된 물의 질량 값으로부터 유동율을 다시 결정하고, 식(1)에 따라 유동 방향전환 오차의 크기를 결정다.

$$\Delta t = \frac{t}{n-1} \left(\frac{q}{q'} \times \frac{\sum_{i=1}^{n-1} m_i / \sum_{i=1}^{n-1} t_i}{(m_1 - m_0)t} - 1 \right) \dots \dots (1)$$

$(m_1 - m_0)t$: 유동 방향전환 밸브를 1회 작동하여 결정한 유동율

$\sum_{i=1}^{n-1} m_i / \sum_{i=1}^{n-1} t_i$: 유동 방향전환 밸브를 20회 작동하여 결정한 유동율

q, q' : 각각의 유동율 결정 실험시 유량계로 감지한 유동율

5t 중량 측정장치의 유동 방향전환 밸브에 대한 오차실험 결과는 Fig. 3과 같다. 매 실험마다 최대용량인 5t까지 물을 수집한다고 가정할 때 10~70kg/s 유동율 범위에서 유동 방향전환 오차가 $\pm 0.05\%$ 이내임을 알 수 있다. 1t 중량 측정 장치에 설치한 유동 방향전환 밸브 오차 실험도 5t 장치의 유동 방향전환 밸브와 똑같은 방법으로 하였고, 유동 방향전환 오차는 $\pm 0.025\%$ 이내였다.⁸⁾ Fig. 4는 각 중량 측정장치의 최대 용량까지 물을 수집하여 유동율을 결정할 때 유동율 측정 데이터의 분산 정도를 실험 유동율의 함수로 나타낸 결과로 최대 0.13%를 넘지 않는다.

2.2 유속분포 실험

테스트 라인의 레이놀즈 수를 1.6×10^5 로 조절한 후 테스트 라인의 초입에 설치된 게이트 밸브로부터 12D, 63D 후방에서 pitot tube 횡단실험을 실시한 결과 Fig. 5와 같은 유속분포를 얻었다. 이때 게이트 밸브에서 63D 후방의 유속분포(b)가 12D 후방의 유속분포(a)보다 대칭성이 향상되어 완전히 발달한 파이프 난류유속분포에 가까워 진것을 알 수 있다.

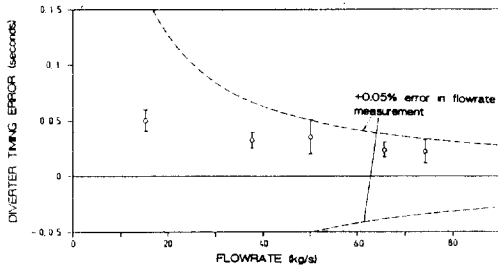


Fig.3 Timer error assessment of 5t system

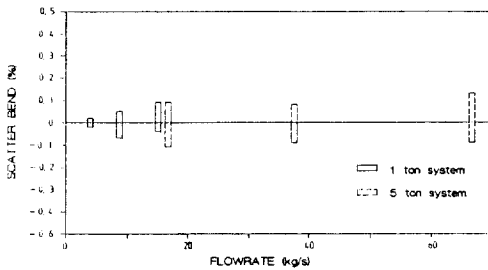
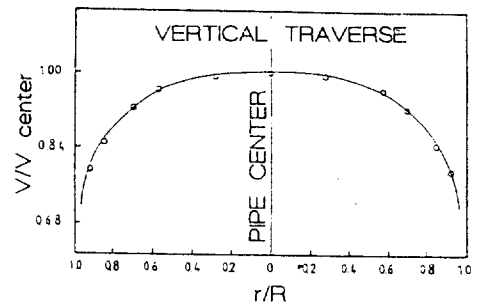
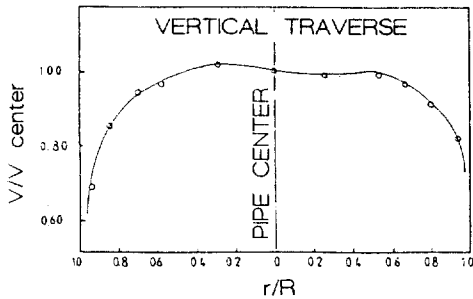
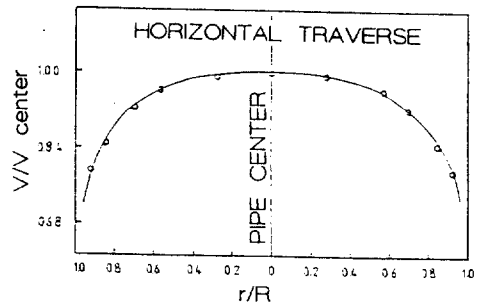
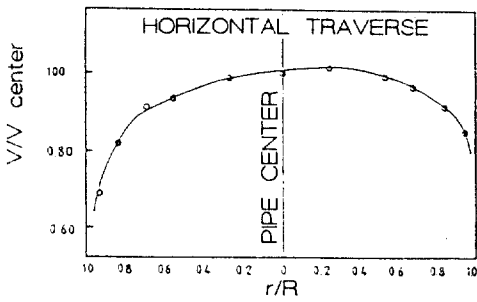


Fig.4 Scattering of flowrate measurement

2.3 터빈 미터 package 실험

접속 구경이 0.15m이고 유량계 특성이 비슷할 것으로 예상되는 동일 모델의 터빈 미터 1과 2를 선정하여 각각에 대한 유량특성 실험을 실시하였다. 이때 터빈 미터 상류쪽에 확보한 직관부의 길이는 13m(약 86D)이고, 0.025m³/s 부터 0.077m³/s까지의 유량범위에서 실험한 결과는 Figs.6과 7에 제시하였다. SAS(Statistical Analysis System)를 이용하여 실험결과를 단순 선형 회귀분석(Simple Linear Regression Analysis)한 결과 터빈미터 1과 2의 K factor (터빈미터를 표준상태에서 1ℓ의 유체가 통과할 때 발생한 펄스의 수)가 유량변화에 대하여 의존성을 가지고 있음을 발견되었고, 두 미터 K factor의 유량 의존도를 비교한 결과 95% 신뢰도 구간에서 비슷하였다. 또한 회귀 직선에 대한 각 미터의 실험 데이터 분산정도도 표준편차가 0.87,



(a)

(b)

Fig.5 Velocity profiles at the section of 12D and 63D downstream from gate valve

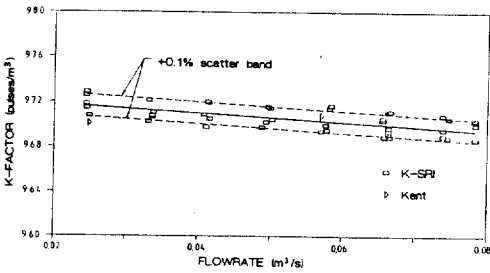


Fig. 6 Calibration of turbine meter 1

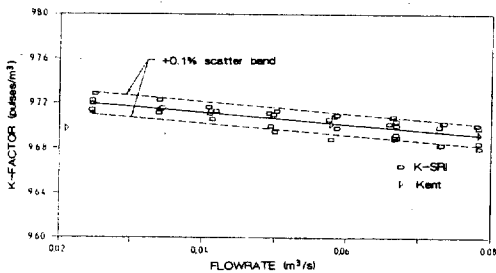


Fig. 7 Calibration of turbine meter 2

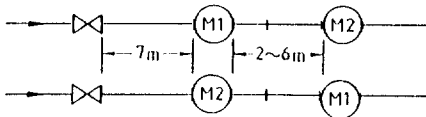


Fig. 8 Layout of twin turbine meter package

0.72로써 그 크기가 거의 같았다. 따라서 터빈 미터 package 구성에 사용하고자 하는 두 대의 유량계가 의도했던대로 서로 유사한 유량특성을 가지고 있음이 실험적으로 증명되었다.

실험관로에 존재하는 유동 불안정성을 감지하기 위해 구성된 한국표준연구소의 터빈 미터 package는 Fig. 8과 같이 두 유량계 사이의 거리를 2m, 4m, 6m로 바꾸면서 유량 실험을 실시할 수 있도록 하였고, NBS나 NEL의 package와는 달리 flow straightening vane을 전혀 사용하지 않았다. 즉 게이트 밸브로부터 약 46D 거리에 설치된 상류측 유량계를 기준으로 삼고 하류측 유량계는 상류측 유량계 때문에 발생하는 교란에 노출시켰고, 교란의 정도는 양 유량계 사이의 거

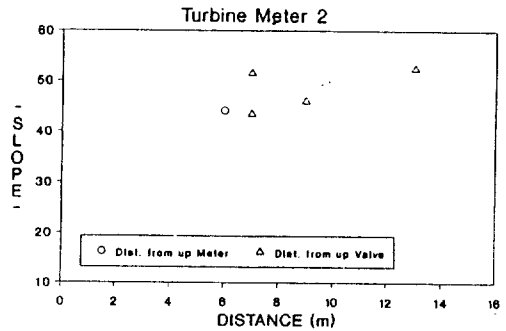
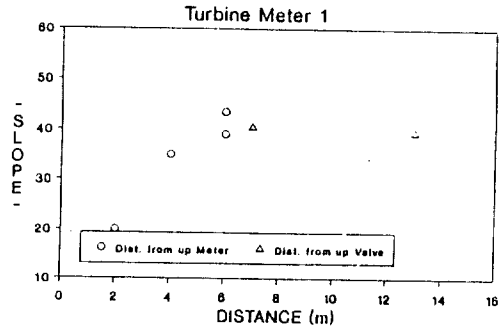


Fig. 9 Test result of twin turbine meter package(slope)

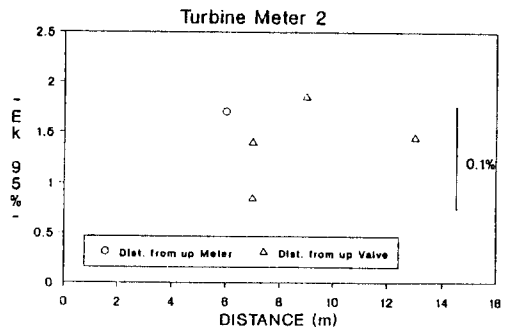
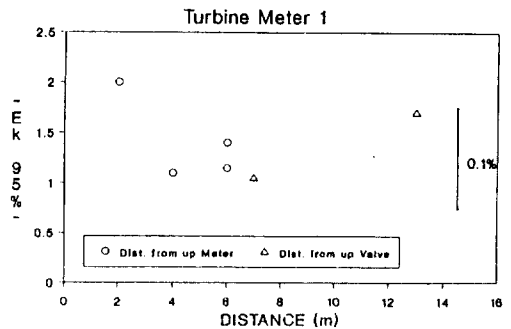


Fig. 10 Test result of twin turbine meter package(K-factor scattering)

리를 바꾸어 줌으로써 조절하였다. 또 유량계 사이의 거리가 6m 경우에는 유량 실험을 되풀이하면서 하류측에 설치된 유량계의 재현도 변화를 관찰하여 유량계 안정도 실험을 시도하였고, 유량계 설치 위치 때문에 발생하는 실험오차를 막기 위해 터빈미터 1과 2의 위치를 바꾸어 설치한 상태에서 유량특성 실험을 되풀이 실시하였다. 실험 결과는 단순 성형 회귀방법을 사용하여 분석한 후 회귀식의 기울기와 테이터 분산정도를 Figs. 9와 10에 제시하였다.

3. 고 찰

실험대상 액체 유량표준 시스템의 표준 유동을 오차요인중 시스템 시험관로의 유동특성 때문에 발생하는 오차가 포함되지 않은 시스템 고유의 오차요인을 계통오차와 우연오차요인으로 나누어 분석하면 다음과 같다.

유량표준 시스템의 오차요인중 계통오차 요인으로 중량 측정장치 교정오차와 부력보정계수 결정오차 그리고 수집시간 측정오차를 들 수 있다. 이중 중량측정장치 교정오차는 교정에 사용한 기준 분동의 질량 오차만에 의하여 결정되고 그 크기는 0.0005% 이내이다. 부력보정계수 결정오차도 평가해본 결과 0.005% 이내였다. 그러나 물 수집시간 측정오차는 타이머 자체가 가지는 고유오차와 유동방향 전환오차가 복합적으로 작용하여 결정된다. 이중 타이머 고유오차는 수집시간을 20s 이상으로 유지하면 0.05% 보다 작게 유지할 수 있고, ISO 4185-1980에서 권고한 방법에 따라 결정한 유동 방향전환 오차는 중량측정 장치의 최대용량까지 물을 수집하여 수집시간이 최소 60s 이상 지속되도록 하는 경우 Fig. 3에 나타난 바와 같이 0.05% 보다 작다. 따라서 이들 두 오차요인이 각각 독립적이라고 가정할 때 수집시간 측정에 관련된 계통오차는 ±0.08% 이내임을 알 수 있다. 표준 유동을 결정에 관련된 모든 계통오차 요인들이 서로 독립적이라면 다음과 같이 전체 계통오차, E_s 를 산정할 수 있다.

$$E_s = \sqrt{(0.0005\%)^2 + (0.005\%)^2} + (0.08\%) = \pm 0.08\% \dots\dots\dots (2)$$

표준 유동을 결정에 관계되는 주요 우연오차 요인으로는 중량측정 오차와 수집시간 측정오차를 들 수 있다. 5t 중량측정 시스템의 경우 3t 이상의 물을 수집하여 측정하면 Fig. 2와 같이 중량측정 오차가 0.02% 이내이고, 1t 중량측정 장치의 경우에는 500kg 이상의 물을 수집하여 측정하면 그 오차가 0.025% 이내로써 두 시스템 중 어느 시스템을 사용하든 시스템 최대용량의 50% 이상의 물을 수집하여 측정하면 우연오차를 0.03% 이내로 억제할 수 있다. 시간 측정 우연오차는 Fig. 4와 같이 표준 질량유동을 분산정도를 유량변화에 따라 실험한 결과에서 산정해본 바 어느 유량에서도 0.13%를 넘지 않을 것으로 생각한다. 따라서 유량 표준시스템의 우연오차(E_r) 요인들을 종합하면 다음과 같다.

$$E_r = \sqrt{(0.03\%)^2 + (0.13\%)^2} = \pm 0.13\% (3)$$

터빈 미터 package를 사용하여 표준 시스템의 시험관로 유동특성이 시스템 고유오차와 함께 유량실험 결과에 미치는 영향의 유무여부를 검출하기 위해서는 데이터 분석결과를 유동특성에 대하여 민감도가 우수한 지표로 나타낼 수 있어야 한다. 이는 특히 국가간 혹은 기관간에 유량표준 시스템 정확도를 비교할 때 실험 데이터의 편차원인을 규명하는데 매우 유용하다. 본 연구에서는 SAS중 단순 선형회귀방정식을 이용하여 터빈 미터 package로 실험한 유량특성 데이터의 최적 회귀직선식을 구한 후 직선식의 기울기와 95% 신뢰도 구간에서의 데이터 분산정도를 지표로 사용하였다.

Fig. 9는 두대의 터빈 미터 사이의 거리를 2m, 4m, 6m로 증가시킴으로써 상류측에 설치된 터빈미터 2에 의한 유동장 교란정도를 변화시키면서 터빈미터 1의 유동특성을 나타내는 최적 회귀직선식의 기울기 변화를 유량계 사이의 거리변화 함수로 나타낸 것이다. 터빈미터 1의 기울기는 상류측에 설치된 터빈미터 2로부터 4m 떨어져 설치할 때부터 기울기가 작

아지기 시작하여 터빈 미터 2로부터 2m 떨어진 지점에 터빈 미터 1을 설치했을 때는 기울기가 6m 지점에 설치했을 때 기울기값의 50% 정도로 작아진다. 그러나 터빈미터 1이 상류측에 설치되었을 때는 게이트 밸브로부터의 거리를 7m부터 11m까지 변화시켜도 터빈미터 1이 터빈미터 2의 6m 하류측에 설치되었을 때의 기울기값과 잘 일치한다. 또 대부분의 실험에서 package 상류측에 설치되는 터빈미터 2의 경우에도 게이트 밸브로부터의 거리를 7m부터 14m까지 변화시켜도 터빈미터 1의 6m 하류측에 설치했을 경우의 기울기값과 잘 일치함을 고려할 때 파이프 라인의 유속분포는 pitot tube 실험결과에서 이미 나타난 바와 같이 게이트 밸브로부터 46D 이상 떨어진 지점에서는 완전하게 발달한 이상적인 유속분포를 가지며 터빈미터가 발생하는 유동장 교란은 6m 하류지점에서는 터빈미터의 유량측정 결과에 영향을 거의 미치지 않을 정도로 작아짐을 알 수 있다. 따라서 터빈미터의 유동특성 기울기 즉 유량변화에 대한 터빈미터 K factor 의존성이 유동장 교란에 매우 민감하게 반응하고, 이 현상을 이용하면 표준 시스템 실험관로 내의 유동교란 존재여부를 식별할 수 있을 것으로 생각한다.

반면 상류측에 설치된 터빈미터에 의한 유동장 교란은 하류측에 설치한 터빈미터 유동특성 데이터의 분산정도에 큰 영향을 미치지 않음이 발견되었다. Fig.10은 터빈미터 1과 2의 재현도 변화를 상류측에 위치하는 터빈미터 혹은 게이트 밸브로부터의 거리의 함수로 나타낸 것이다. 두 미터의 재현도 특성이 95% 신뢰도 구간에서 거의 같을뿐 아니라 설치위치를 바꾸어도 재현도가 통계적으로 유의성을 부여할 수 있을 정도로 변하지 않음을 발견하였다. 더구나 터빈미터를 하나씩 별도로 실험한 결과와 package 실험결과 사이에도 유의성을 주장할 수 있는 정도의 재현도 변화가 나타나지 않음을 살펴볼 때 데이터 분산 정도만을 비교해서는 실험관로내의 유동장 교란유무를 감지하기 어려울 것으로 생각한다.

4. 결 론

터빈미터가 설치된 위치에 존재하는 실험관로 유동장 교란은 터빈미터 K factor의 유동을 변화 의존성에 큰 영향이 미침을 발견하였고, 이러한 현상은 유량표준 시스템의 실험관로 유동특성이 유량 실험결과에 미치는 영향을 규명하는데 매우 유용할 것으로 생각한다. 즉 두개의 서로 다른 유량표준 시스템의 정확도를 상호비교하고자 할 때 두 터빈미터 사이의 거리가 6m 이상인 터빈미터 package를 이용하여 유량실험을 실시한 후 하류측에 설치된 터빈미터의 유량측정 결과를 기준으로 삼고 상류측 유량계와 유량계 계수의 유동을 의존도와 분산정도를 상호 비교분석하면 유량표준 시스템의 실험관로 유동특성이 터빈미터의 유량측정 결과에 영향을 미치는지 그 여부를 알 수 있다. 그러나 NEL에서 시도한 경우처럼 두 터빈미터 사이에 flow straightening vane을 설치하면 터빈미터 package를 소형화할 수 있지만 straightening vane이 상류측 터빈미터가 발생하는 유동장 교란이 하류측 터빈미터에 미치는 영향을 배제하여 일정한 실험조건을 유지하는 역할을 할뿐 기준 유동상태인 완전하게 발달한 이상적인 유속분포⁶⁾를 보증할 수 없기 때문에 터빈미터 package를 이용한 유량표준 시스템의 정확도 비교실험에서 straightening vane의 사용은 vane 하류측에서의 유속분포에 대한 충분한 데이터가 확보되지 않은 경우에는 많은 주의가 필요하다. 실험 대상으로 선정된 액체 유량표준 시스템은 용량이 0.1m³/s 인 중량식 시스템으로 유량 측정시점 상류측에 46D 이상의 직관부를 확보하면 유량측정 지점에서의 유동특성이 완전히 발달한 난류 유속분포에 가까워져 유량표준 정확도 유지에 적합하게 설계되었음이 실험적으로 밝혀졌다. 시스템 고유오차는 계통오차가 $\pm 0.08\%$ 이고 우연오차가 95% 신뢰도 구간에서 $\pm 0.13\%$ 이내였다.

5. 감사의 글

본 연구는 과학기술처에서 시행한 출연연구사업의 일부로 수행되었습니다. 연구과제 수행중 유량계 실험에 적극 참여해주신 이생희 씨 그리고 윤병로씨에게 감사드리고, 유량표준 시스템을 건설하는데 적극 협력해주신 본 연구소 시설과 직원들께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Hayward, A.T.J., "Flowmeters-A basic guide and source-book for users", The MacMillan Press, 1979.
2. Mattingly, G.E., Pursley, W.C., Paton, R., and Spencer, E.A., "Steps towards an ideal transfer standard for flow measurement", in Proceedings of FLOMEKO Conference 1978, Amsterdam: North Holland Pub. Co., 1978.
3. Youden, W.J., "Graphical diagnosis of interlaboratory test results", Industrial Quality Control, Vol. 15, No. 11, pp. 133-137, 1959.
4. Paton, R., and Pursley, W.C., "Report on the Exchange of a Twin-turbine Meter Flow Transfer Standard between NEL and PTB, Braunschweig, West Germany", NEL Y4/275, 1979.
5. Law, E.M., "Flow conditioning - A new development", Flow Meas. Instrum. Vol. 1, No. 3, pp. 165-170, 1990.
6. Paik, J.S., Lee, K.B., and Choi, H.M., "Establishment of liquid mass-flowrate measurement standards", KSRI-87-8-IR, pp. 225-279, 1987.
7. Paik, J.S., "Liquid flow calibration using load cell weighing machine", Bulletin OIML No. 111, pp. 13-24, 1988.
8. ISO 4185-1980, "Measurement of liquid flow in closed conduits- Weighing method", 1980.