

## 물 유량 표준시스템 불확도 평가

이광복\*

세계적으로 무역이 확대되고 경제의 세계화가 진전함에 따라, 서로 다른 국가에서 이루어지는 측정결과를 쉽게 비교할 수 있도록 불확도를 평가하고 표현하는 방법을 통일시키고자 하는 움직임이 오래전부터 전개되어 왔고 그 결과 국제표준화기구(ISO)가 여러 국제기구와 합동으로 측정불확도 표현지침서를 발행하였다.

새로운 지침서에 의한 불확도 표현방법은 기존에 사용하던 우연오차와 계통오차 개념대신 평가방법에 따라 A형 불확도와 B형 불확도를 사용한다.

본 내용은 이 같은 새로운 불확도 평가방법에 근거하여 한국표준과학연구원의 물 유량 표준시스템이 가지는 유량측정 불확도를 평가해 본 것이다.

### 1. 적용범위

본 불확도 평가는 한국표준과학연구원 유체유동그룹의 중량식 물 유량 표준시스템 I에 적용한 것이다.

불확도 평가는 다음과 같은 운전조건을 근거로 하였다.

유동율범위 : 40 to 400 m<sup>3</sup>/h

물 온도 범위 : 5 to 40°C

물 수집량 : 2,500~5,000 kg

최저 수집시간 : 45초

유동모드 : Flying-start-and-finish

유동발생 : 일정수두탱크(Constant Head Tank)

### 2. 인용규격

(1) ISO/IEC/OIML/BIPM, Guide to the Expression

of Uncertainty in Measurement, ISO 1995.

(2) Measurement of Fluid Flow - Estimation of Uncertainty of a Flow-rate Measurement, ISO 5168, 2002.

(3) Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits by the Weighing Method-Procedures for Checking Installations - Part 1:Static Weighing Systems, ISO 9368-1, 1990(E).

(4) Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits -Weighing Method, ISO 4185, 1983.

### 3. 시스템 개요

물유량 표준장치의 기본구성은 저장탱크와 펌프 그리고 안정적인 2차 유동 발생장치인 정압수두탱크, 실험대상 유량계 설치를 위한 충분한 길이의 직관부가 확보된 시험관로, 유동을 조절밸브, 그리고 flying-start-and-finish 방식 실험을 위한 유동방향 전환장치와 타이머 및 유동노즐 그리고 최종적으로 실험대상 유량계를 수집된 물을 수집하여 계량하는 저울로 되어 있다.

우리 연구원의 물 유량표준시스템은 세계의 용량으로 구성되어 있지만, 이번 불확도 평가의 예로 채택한 시스템 I은 물 계량 저울의 용량이 5000 kg이며, 수두 18m의 정압수두탱크와 최대 관직경 250 mm 크기의 시험관로가 마련되어 있다.

기본 동작원리는 실험유동율이 설정되고 모든 계측장비가 안정화 되면 시험관로에 설치된 유량계를 통과한 물은 노즐과 유동방향전환장치에 의해 계량장치에 수집되고 그때의 수집시간사간도 측정된다. 저울이 안정화 되면 수집된 물이 계량된다.

실험이 진행되는 동안 시험관로상에 설치된 온도계에 의해 측정된 온도를 사용하여 계량된 물의 부피가 계산된다.

다음은 물 유량표준시스템의 계략도이다.

\* 한국표준과학연구원 유체유동그룹  
E-mail : kblee@kriss.re.kr

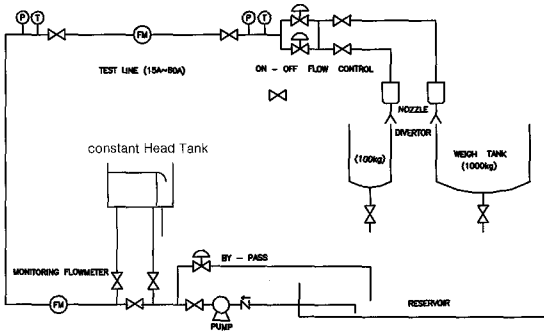


Fig 3-1. Schematic layout of water flow standard system

## 4. 불확도

### 4.1 측정 모델

물 유량 표준시스템의 유동율측정은 다음과 같은 요소들의 함수로 불확도 요인은 다음과 같다.

$$q = f(W_m, t, \rho, \rho_a, \rho_w)$$

- $W_m$  : 무게측정 kg
- $t$  : 시간측정 s
- $\rho$  : 물밀도 kg/m<sup>3</sup>
- $\rho_a$  : 공기밀도 kg/m<sup>3</sup>
- $\rho_w$  : 추밀도 kg/m<sup>3</sup>

물 유량 표준시스템의 질량유동율은 다음과 같은 계산식으로 주어진다.

$$q_m = \frac{W_m}{t} \varepsilon \quad (1)$$

여기서 부력보정계수  $\varepsilon = (1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}) / (1 - \frac{\rho_a}{\rho})$

그리고 물 유량 표준시스템의 부피 유동율은 다음과 같다.

$$q_v = \frac{W_m}{\rho t} \varepsilon \quad (2)$$

식(1)은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} q_m &\equiv \frac{W_m}{t} (1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}) (1 + \frac{\rho_a}{\rho}) \\ &\equiv \frac{W_m}{t} (1 - \frac{\rho_a}{\rho_w} + \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{\rho_a^2}{\rho \rho_w}) \end{aligned} \quad (3)$$

식(2)는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} q_v &= \frac{W_m}{\rho t} (1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}) (1 + \frac{\rho_a}{\rho}) \\ &\equiv \frac{W_m}{\rho t} (1 - \frac{\rho_a}{\rho_w} + \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{\rho_a^2}{\rho \rho_w}) \\ &\equiv \frac{W_m}{t} (\frac{1}{\rho} - \frac{\rho_a}{\rho \rho_w} + \frac{\rho_a}{\rho^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_w}) \end{aligned} \quad (4)$$

### 4.2 불확도 표현

합성표준불확도는 다음식에 의해서 구한다.

$$\begin{aligned} u_c(q) &= [ [C(W_m)u(W_m)]^2 + [C(t)u(t)]^2 \\ &\quad + [C(\rho)u(\rho)]^2 + [C(\rho_a)u(\rho_a)]^2 \\ &\quad + [C(\rho_w)u(\rho_w)u(\rho_w)]^2 ]^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 C : 감도계수

따라서 식(5)는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_c(q) &= [ [ -\frac{\partial q}{\partial W_m} u(W_m) ]^2 \\ &\quad + [ -\frac{\partial q}{\partial t} u(t) ]^2 + [ -\frac{\partial q}{\partial \rho} u(\rho) ]^2 + \\ &\quad + [ -\frac{\partial q}{\partial \rho_a} u(\rho_a) ]^2 + [ -\frac{\partial q}{\partial \rho_w} U(\rho_w^2) ]^{1/2} \end{aligned} \quad (6)$$

따라서

질량유동율의 합성표준불확도는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_c(q_m) &= [ [ \frac{1}{t} (1 - \frac{\rho_a}{\rho_w} + \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{\rho_a^2}{\rho \rho_w}) \times u(W_m) ]^2 \quad (\text{무게}) \\ &\quad + [ -\frac{W_m}{t^2} (1 - \frac{\rho_a}{\rho_w} + \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{\rho_a^2}{\rho \rho_w}) \times u(t) ]^2 \quad (\text{시간}) \\ &\quad + [ \frac{W_m}{t} (-\frac{\rho_a}{\rho^2} + \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_w}) \times u(\rho) ]^2 \quad (\text{물 밀도}) \\ &\quad + [ \frac{W_m}{t} (-\frac{1}{\rho_w} + \frac{1}{\rho} - \frac{2\rho_a}{\rho \rho_w}) \times u(\rho_a) ]^2 \quad (\text{공기 밀도}) \\ &\quad + [ \frac{W_m}{t} (\frac{\rho_a}{\rho_w^2} + \frac{\rho_a^2}{\rho \rho_w^2}) \times u(\rho_w) ]^{1/2} \quad (\text{추 밀도}) \end{aligned}$$

그리고 부피유동율의 합성표준불확도는 다음과 같다.

$$u_c(q_v) = [ [ \frac{1}{t} (\frac{1}{\rho} - \frac{\rho_a}{\rho \rho_w} + \frac{\rho_a}{\rho^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_w}) \times u(W_m) ]^2 \quad (\text{무게})$$

$$\begin{aligned}
 &+ \left[ -\frac{W_m}{t^2} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{\rho_a}{\rho \rho_w} + \frac{\rho_a}{\rho^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_w} \right) \times u(t) \right]^2 && \text{(시간)} \\
 &+ \left[ \frac{W_m}{t} \left( -\frac{1}{\rho^2} + \frac{\rho_a}{\rho^2 \rho_w} - \frac{2\rho_a}{\rho^3} + \frac{2\rho_a^2}{\rho^3 \rho_w} \right) \times u(\rho) \right]^2 && \text{(물 밀도)} \\
 &+ \left[ \frac{W_m}{t} \left( -\frac{1}{\rho \rho_w} + \frac{1}{\rho^2} - \frac{2\rho_a}{\rho^2 \rho_w} \right) \times u(\rho_a) \right]^2 && \text{(공기 밀도)} \\
 &+ \left[ \frac{W_m}{t} \left( \frac{\rho_a}{\rho \rho_w^2} + \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_w^2} \right) \times u(\rho_w) \right]^2 && \text{(추 밀도)}
 \end{aligned}$$

### 4.3 요소별 불확도 평가

본 불확도 평가 실에는 5000 kg 용량의 저울로 구성된 System I에 대한 것만 수록하였다. System II와 System III도 동일한 방법과 절차를 적용한다.

#### 4.3.1 무게측정 불확도

교정된 추를 사용하여 저울을 교정하므로 무게측정 불확도는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 u(W_m) &= \sqrt{u^2(W_m)_{DW} + u^2(W_m)_{WB}} && (7) \\
 u(W_m)_{DW} &: \text{추의 불확도} \\
 u(W_m)_{WB} &: \text{Weigh-Bridge 불확도}
 \end{aligned}$$

#### [ System I ]

##### (1) 추의 불확도

성적서에 표기된 확장불확도는 2.5 g

포함인자 = 2

1회의 전구간 교정에 사용된 분동은 10회 이므로

최대 합성표준불확도는

$$\begin{aligned}
 u(W_m)_{DW} &= 10 \text{회} \times 1.25 \times 10^{-3} \text{ kg} \\
 &= 1.25 \times 10^{-2} \text{ kg} \\
 u^2(W_m)_{DW} &= 1.562 \times 10^{-4} \text{ kg}^2
 \end{aligned}$$

##### (2) Weigh-Bridge 불확도

정된 추를 사용하여 실험한 data로부터 가장 편차가 큰 부분을 근거로 계산한 표준불확도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u(W_m)_{WB} &= \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} && (8) \\
 u(W_m)_{WB} &= 1.897 \times 10^{-1} \text{ kg}, \quad \nu_{WB} = 2
 \end{aligned}$$

따라서 무게측정 불확도와 유효자유도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u(W_m) &= [(1.250 \times 10^{-2})^2 + (1.897 \times 10^{-1})^2]^{1/2} \\
 &= 1.901 \times 10^{-1} \text{ kg} \\
 \nu_{\text{weighing}} &= 2
 \end{aligned}$$

#### 4.3.2 수집시간 측정 불확도 : $u(t)$

$$u^2(t) = u^2(t)_{\text{counter}} + u^2(t)_{\text{diverter}} \quad (9)$$

##### (1) Time Counter

성적서로부터

Measured frequency : 10 000 000 Hz

Uncertainty 0.08 Hz (at 95 % confidence level, coverage factor 2)

따라서

$$u(t)_{\text{counter}} = \frac{1}{0.08} \times \frac{1}{10000000} = 1.25 \times 10^{-6} \text{ s}$$

##### (2) Diverter 실험 data에서

#### [ System I ]

##### 1) $\Delta t$ (ISO 4185 section 6.2.1.3 및 Annex A1.2)

$$\begin{aligned}
 u(t)_{\text{diverter}} \Delta t &= \frac{((q_i - q_n) - (q_{ii} - q_{nn})) / q_n}{\frac{1}{t_{q_i}} - \frac{1}{t_{q_n}}} \\
 &= \frac{0.001}{0.1} = 1.0 \times 10^{-2} \text{ s} && (10)
 \end{aligned}$$

$t_{q_i}$  : 짧은 수집시간

$t_{q_n}$  : 정상 수집시간

$q_i$  : 짧은 수집시간에 의한 유량

$q_n$  : 정상 시간시간에 의한 유량

$q_{ii}$  : 짧은 수집시간 동안 유량계의 유량

$q_{nn}$  : 정상 수집시간 동안 유량계의 유량

##### 2) 유동율 반복성 (ISO 4185 section 6.2.2.2)

수집시간 45초 이상으로 할 때 최대치를 참조하면

$$\begin{aligned}
 u(t)_{\text{diverter}} \Delta q &= 3.355 \times 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{h} \\
 &\text{(평균유동율 259.73 m}^3/\text{h 에서)}
 \end{aligned}$$

위의 반복성은 수집시간 45초를 기준으로 하여 다음과 같이 시간의 분산치의 크기로 변환시킬 수 있다.

$$u(t)_{diverter} \Delta q = 45 \text{ s} \times \frac{3.355 \times 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{h}}{259.73 \text{ m}^3 / \text{h}} = 5.813 \times 10^{-3} \text{ s}$$

따라서 전환장치 작동에 의한 불확도와 그 유효자유도는 다음과 같다.

$$u(t)_{diverter} = \sqrt{u^2(t)_{diverter} \Delta t + u^2(t)_{diverter} \Delta q}$$

$$u(t)_{diverter} = 1.157 \times 10^{-2} \text{ s}, \quad v_{diverter} = 39$$

결국 수집시간 측정 불확도와 유효자유도는 다음과 같다.

$$u(t) = \sqrt{u^2(t)_{counter} + u^2(t)_{diverter}}$$

$$u(t) = [(1.1250 \times 10^{-6})^2 + (1.157 \times 10^{-2})^2]^{1/2} = 1.157 \times 10^{-2} \text{ s}$$

$$v_{time} = 39$$

#### 4.3.3 물밀도 불확도 : $u(\rho)$

물의 밀도는 실제 측정하지 않고 질량그룹에서 측정한 데이터를 근거로한 회귀식을 사용해 구한다.

물의 밀도 불확도는 그 회귀식, 온도센서 그리고 시험관로에서의 온도측정 불확도들로부터 유도된다.

아래 식은 5~40°C 범위에서의 밀도를 나타내는 방정식으로 표준과학연구원 질량그룹에 의해 설정되었다.

$$\rho = 1000.024246 + 0.047689 T - 0.007263 T^2 + 0.000032 T^3 \quad (11)$$

윗식의 표준불확도 및 유효자유도는 다음과 같다.

$$u(\rho_1) \approx 0.01 \text{ kg} / \text{m}^3, \quad v_{\rho_1} = 66$$

그리고 물 유량 표준시스템에 사용되는 모든 온도센서의 교정결과 표준불확도의 최대치와 유효자유도는 다음과 같다.

$$u(T_1) = 0.05 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad v_{T_1} = 55$$

그리고 실제 1회의 시험이 진행되는 동안 시험관로에서의 온도변화는 최대  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ . 이내이므로 그에 대

해 80 %의 신뢰성과 반너비의 직사각형 분포를 가정하면 이 같은 온도 불안정에 기인한 표준불확도와 유효자유도는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$u(T_2) = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.12 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad v_{T_2} = \frac{1}{2} \left( \frac{100}{20} \right)^2 \approx 12$$

온도센서와 시험관로에서 온도변화에 대한 불확도  $u(T_1)$ 과  $u(T_2)$ 는 다음과 같다.

$$u(T) = [u(T_1)^2 + u(T_2)^2]^{1/2} = (0.05^2 + 0.12^2)^{1/2} = 0.13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\nu_T = u(T)^4 / [ (u(T_1)^4 / \nu_{T_1}) + (u(T_2)^4 / \nu_{T_2}) ]$$

$$= 0.13^4 / [ (0.05^4 / 55) + (0.12^4 / 2) ] \approx 16$$

따라서 온도센서의 측정불확도와 물 밀도 회귀방정식 사용에 따른 표준불확도는 다음과 같이 표시된다.

$$u(\rho_2) = |(\partial \rho / \partial T)|_{25^\circ\text{C}} \times u(T)$$

$$= (0.047689 - 0.01452625 + 0.000096(25)^2) \times 0.13$$

$$= 0.255 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\nu_{\rho_2} = \nu_T = 16$$

결국 물 밀도 측정에 대한 합성된 표준불확도와 유효자유도는 다음과 같이 정리된다.

$$u(\rho) = (u_1(\rho)^2 + u_2(\rho)^2)^{1/2} = 0.255 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\nu_\rho = u(\rho)^4 / [ u_1(\rho)^4 / \nu_{\rho_1} + u_2(\rho)^4 / \nu_{\rho_2} + u_3(\rho)^4 / \nu_{\rho_3} ]$$

$$= 0.225^4 / [ (0.01^4 / 66) + (0.255^4 / 16) ] \approx 16$$

#### 4.3.4 공기밀도 불확도 : $u(\rho_a)$

Table로부터 온도와 압력 변화에 따른 공기의 밀도 ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ) 는 다음과 같다.

Atmospheric Pressure (mbar)	Air Temperature ( $^\circ\text{C}$ )		
	10	20	30
970	1.191	1.148	1.106
1010	1.240	1.196	1.152
1030	1.265	1.219	1.175

그리고 습도 변화에 따른 보정 값은 다음과 같다.

Humidity(RH %)	Air Temperature at 20 °C
40	+0.002
50	0
80	-0.006

따라서 대기압 1010 mb, 온도 20°C, 상대습도 50%를 기준으로 채택한 공기밀도는 실제 실험환경에서 최대변화량은 1.100~1.196~m<sup>3</sup> 1.267 kg/m<sup>3</sup>이 된다.

따라서 큰쪽 반너비는 0.096kg/m<sup>3</sup>이고 직사각형 분포를 가진다고 하면 표준불확도와 그 유효자유도는 다음과 같다.

$$u(\rho_a) = \frac{9.60 \times 10^{-2}}{\sqrt{3}} = 5.542 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$$

$$\nu_{\rho a} = \infty$$

#### 4.3.5 추밀도 불확도 : $u(\rho_w)$

Weigh-Bridge 교정에 사용된 stainless steel의 밀도는 7.8×10<sup>3</sup>kg/m<sup>3</sup>로 유효숫자의 불확도가 직사각형 분포를 갖는다면 그때 표준불확도와 유효자유도는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$u(\rho_w) = \frac{50}{\sqrt{3}} = 2.886 \times 10 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu_{\rho w} = \infty$$

### 4.4 감도계수

각 측정요소의 감도계수는 질량유동율에 대해서는 식(3)을 그리고 부피유동율에 대해서는 식(4)을 각각의 요소에 대해 편미분하여 구한다.

#### 4.4.1 무게측정 : $C(W_m)$

질량유동율에 대해

$$\begin{aligned} C_m(W_m) &= \frac{\partial f}{\partial W_m} = \frac{1}{t} \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_w} + \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{\rho_a^2}{\rho \rho_w} \right) \\ &= \frac{1}{45} \left( 1 - \frac{1.2}{7.8 \times 10^3} + \frac{1.2}{1 \times 10^3} - \frac{1.2^2}{1 \times 10^3 \times 7.8 \times 10^3} \right) \\ &= 2.225 \times 10^{-2} \left( \frac{1}{s} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

부피유동율에 대해

$$\begin{aligned} C_v(W_m) &= \frac{\partial f}{\partial W_m} = \frac{1}{t} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{\rho_a}{\rho \rho_w} + \frac{\rho_a}{\rho^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_w} \right) \\ &= \frac{1}{45} \left( \frac{1}{1 \times 10^3} - \frac{1.2}{1 \times 10^3 \times 7.8 \times 10^3} + \frac{1.2}{1 \times 10^6} - \frac{1.2^2}{1 \times 10^6 \times 7.8 \times 10^3} \right) \\ &= 2.225 \times 10^{-5} \left( \frac{m^3}{s \cdot kg} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

#### 4.4.2 시간측정 : $C(t)$

[ System I ]

질량유동율에 대해

$$\begin{aligned} C_m(t) &= \frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{W_m}{t^2} \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_w} + \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{\rho_a^2}{\rho \rho_w} \right) \\ &= -\frac{5000}{45^2} \left( 1 - \frac{1.2}{7.8 \times 10^3} + \frac{1.2}{1 \times 10^3} - \frac{1.2^2}{7.8 \times 10^6} \right) \\ &= -2.472 \left( \frac{kg}{s^2} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

부피유동율에 대해

$$\begin{aligned} C_v(t) &= \frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{W_m}{t^2} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{\rho_a}{\rho \rho_w} + \frac{\rho_a}{\rho^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_w} \right) \\ &= -\frac{5000}{45^2} \left( \frac{1}{1 \times 10^3} - \frac{1.2}{7.8 \times 10^6} + \frac{1.2}{1 \times 10^6} - \frac{1.2^2}{7.8 \times 10^9} \right) \\ &= -2.472 \times 10^{-3} \left( \frac{m^3}{s^2} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

#### 4.4.3 물밀도 측정 :

[ System I ]

질량유동율에 대해

$$\begin{aligned} C_m(\rho) &= \frac{\partial f}{\partial \rho} = \frac{W_m}{t} \left( -\frac{\rho_a}{\rho^2} + \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_w} \right) = \frac{5000}{45} \left( -\frac{1.2}{1 \times 10^6} + \frac{1.2^2}{7.8 \times 10^9} \right) \\ &= -1.333 \times 10^{-4} \left( \frac{m^3}{s} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

부피유동율에 대해

$$\begin{aligned} C_v(\rho) &= \frac{\partial f}{\partial \rho} = \frac{W_m}{t} \left( -\frac{1}{\rho^2} + \frac{\rho_a}{\rho^2 \rho_w} - \frac{2\rho_a}{\rho^3} + \frac{2\rho_a^2}{\rho^3 \rho_w} \right) \\ &= \frac{5000}{45} \left( -\frac{1}{1 \times 10^6} + \frac{1.2}{7.8 \times 10^9} - \frac{2 \times 1.2}{1 \times 10^9} + \frac{2 \times 1.2^2}{7.8 \times 10^{12}} \right) \\ &= -1.114 \times 10^{-4} \left( \frac{m^6}{s \cdot kg} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

4.4.4 공기밀도 측정 :  $C(\rho_a)$

[ System I ]

질량유동율에 대해

$$C_m(\rho_a) = \frac{\partial f}{\partial \rho_a} = \frac{W_m}{t} \left( -\frac{1}{\rho_w} + \frac{1}{\rho} - \frac{2\rho_a}{\rho\rho_w} \right) = \frac{5000}{45} \left( -\frac{1}{7.8 \times 10^3} + \frac{1}{1 \times 10^3} - \frac{2 \times 1.2}{7.8 \times 10^6} \right) = 9.683 \times 10^{-2} \left( \frac{m^3}{s} \right) \quad (18)$$

부피유동율에 대해

$$C_v(\rho_a) = \frac{\partial f}{\partial \rho_a} = \frac{W_m}{t} \left( -\frac{1}{\rho\rho_w} + \frac{1}{\rho^2} - \frac{2\rho_a}{\rho^2\rho_w} \right) = \frac{5000}{45} \left( -\frac{1}{7.8 \times 10^6} + \frac{1}{1 \times 10^6} - \frac{2 \times 1.2}{7.8 \times 10^9} \right) = 9.683 \times 10^{-5} \left( \frac{m^6}{s \cdot kg} \right) \quad (19)$$

4.4.5 추밀도 측정 :  $C(\rho_w)$

[ System I ]

질량유동율에 대해

$$C_m(\rho_w) = \frac{\partial f}{\partial \rho_w} = \frac{W_m}{t} \left( \frac{\rho_a}{\rho_w^2} + \frac{\rho_a^2}{\rho\rho_w^2} \right) = \frac{5000}{45} \left( \frac{1.2}{7.8^2 \times 10^6} + \frac{1.2^2}{7.8^2 \times 10^9} \right) = 2.194 \times 10^{-6} \left( \frac{m^3}{s} \right) \quad (20)$$

부피유동율에 대해

$$C_v(\rho_w) = \frac{\partial f}{\partial \rho_w} = \frac{W_m}{t} \left( \frac{\rho_a}{\rho\rho_w^2} + \frac{\rho_a^2}{\rho^2\rho_w^2} \right) = \frac{5000}{45} \left( \frac{1.2}{7.8^2 \times 10^9} + \frac{1.2^2}{7.8^2 \times 10^{12}} \right) = 2.194 \times 10^{-9} \left( \frac{m^6}{s \cdot kg} \right) \quad (21)$$

4.5 합성표준불확도

4.5.1 계산

[ System I ]

식(5)에서 합성표준불확도는 다음과 같이 표시되었다.

$$u_c(q) = \left[ [C(W_m)u(W_m)]^2 + [C(t)u(t)]^2 + [C(\rho)u(\rho)]^2 + [C(\rho_a)u(\rho_a)]^2 + [C(\rho_w)u(\rho_w)]^2 \right]^{1/2}$$

따라서

질량유동율에 대해서

$$u_c(q_m) = 2.940 \times 10^{-2} \text{ kg/s} = 105.822 \text{ kg/h}$$

부피유동율에 대해서

$$u_c(q_v) = 4.087 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} = 0.147 \text{ m}^3/\text{h}$$

System I 의 합성표준불확도는 최대 유동율 400,000 kg/h (400m<sup>3</sup>/h)을 근거로 하여 상대불확도로 표시하면 다음과 같다.

질량유동율에 대해서

$$u_c(q_m)/q_m = (105.822 / 400,000) \times 100 = 0.026 \%$$

부피유동율에 대해서

$$u_c(q_v)/q_v = (0.147 / 400) \times 100 = 0.036 \%$$

합성 유효자유도는 Welch-Satterthwaite식에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{v_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{[c_i u(x_i)]^4}{v_i}} \quad (22)$$

여기서  $v_i$ 는  $u(x_i)$ 의 자유도

따라서 물 유량 표준시스템 System I의 합성 유효 자유도는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$v_q = u(q)^4 / \left[ (C(W_m)u(W_m))^4 / v + (C(t)u(t))^4 / v_t + (C(\rho)u(\rho))^4 / v_\rho + (C(\rho_a)u(\rho_a))^4 / v_{\rho_a} + (C(\rho_w)u(\rho_w))^4 / v_{\rho_w} \right] \quad (23)$$

결국

질량유동율에 대해

$$v_{q_m} = 43$$

부피유동율에 대해

[ System I ]

$$\nu_{q_v} = 48$$

95 % 신뢰수준에서 유효자유도에 대응하는 포함인자는 다음과 같다.

#### 4.5.2 불확도 명세표

[System I]

$$k_{95,m} = k_{95,v} = 2.01$$

따라서 상대 확장불확도는 다음과 같다.

질량유동율에 대해

#### 4.6 확장불확도 계산

$$\begin{aligned} U_{95}/|q_m| &= k_{95,qm} \times (u_c(q_m)/|q_m|) \\ &= 2.01 \times 0.026\% = 0.052\% \end{aligned}$$

명시된 신뢰수준에서의 확장불확도는 그 유효자유도에 대응하는 포함인자(coverage factor)와 합성표준 불확도의 곱으로 구해진다.

부피유동율에 대해

95 % 신뢰수준에서의 상대 확장불확도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} U_{95}/|qv| &= k_{95,qv} \times (u_c(qv)/|qv|) \\ &= 2.01 \times 0.036\% = 0.072\% \end{aligned}$$

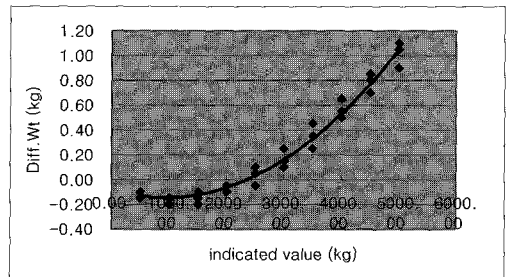
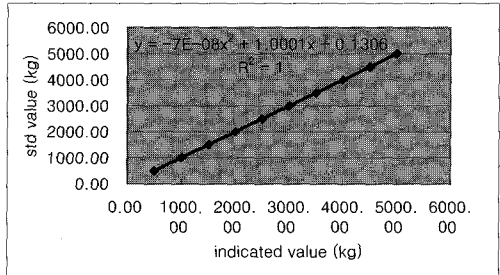
Table 4-1 Uncertainty budget of water flow rate measurement for System I

Standard Uncertainty Component	Source of Uncertainty	Type	Probability distribution	Value of Standard Uncertainty $u(x_i)$	Sensitivity Coefficient $c_i$	Degrees of freedom $\nu_i$
$W_m$ (kg)	Weighing			$1.901 \cdot 10^{-1}$		
	Reference weight	B	Normal	$(1.250 \cdot 10^{-2})$	$[2.225 \cdot 10^{-2}]$	2 (55)
	Weigh-bridge calibration	A	Normal	$(1.897 \cdot 10^{-1})$	$2.225 \cdot 10^{-5}$	(2)
$t$ (s)	Collection time			$1.157 \cdot 10^{-2}$		39 (55)
	Time counter	B	Rectangular	$(1.250 \cdot 10^{-6})$	$[-2.472 \cdot 10^0]$	(39)
	Diverting	A	Normal	$(1.157 \cdot 10^{-2})$	$-2.472 \cdot 10^{-3}$	<39>
	-Diverter t	A	Normal	$<1.000 \cdot 10^{-2}>$		<39>
	-Diverter scattering	A	Normal	$<5.813 \cdot 10^{-3}>$		
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Water density			$2.550 \cdot 10^{-1}$		16 (66)
	Regression equation	B	Normal	$(1.000 \cdot 10^{-2})$	$[-1.333 \cdot 10^{-4}]$	
	Temperature measurement	B	Rectangular	$(2.550 \cdot 10^{-1})$	$-1.114 \cdot 10^{-4}$	(16)
$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	Air density				$[9.683 \cdot 10^{-2}]$	
	Table	B	Rectangular	$5.542 \cdot 10^{-2}$	$9.683 \cdot 10^{-5}$	
$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	Reference weight density				$[2.194 \cdot 10^{-6}]$	
	Table	B	Rectangular	$2.886 \cdot 10^{-1}$	$2.194 \cdot 10^{-9}$	

Appendix A Deadweight / water calibration result of the Weigh-Bridge

[ System 1 ]

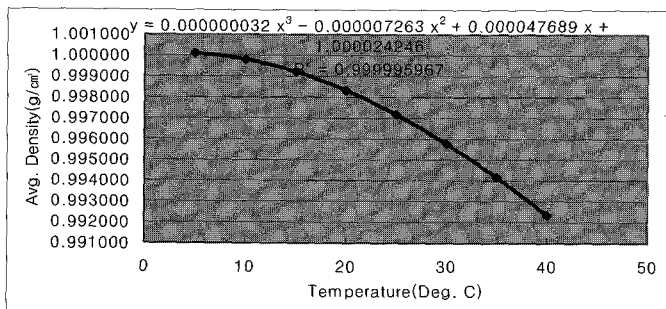
Ref.Wt (kg)	Read Wt (kg)	Diff.Wt (kg)	Val.by Eq (kg)	bias Eq (kg)	Avg.bias (kg)	Std.U (kg)
500.00	499.85	-0.15	500.00	0.00	0.018	0.020
500.00	499.90	-0.10	500.05	0.05		
500.00	499.85	-0.15	500.00	0.00		
999.65	999.45	-0.20	999.60	-0.05	-0.018	0.020
1008.90	1008.75	-0.15	1008.90	0.00		
1003.80	1003.65	-0.15	1003.80	0.00		
1505.20	1505.00	-0.20	1505.11	-0.09	-0.039	0.035
1508.35	1508.20	-0.15	1508.31	-0.04		
1510.50	1510.40	-0.10	1510.51	0.01		
2003.65	2003.55	-0.10	2003.59	-0.06	-0.045	0.020
2002.35	2002.25	-0.10	2002.29	-0.06		
2004.00	2003.95	-0.05	2003.99	-0.01		
2502.85	2502.80	-0.05	2502.73	-0.12	-0.037	0.054
2502.85	2502.95	0.10	2502.88	0.03		
2510.65	2510.70	0.05	2510.63	-0.02		
3002.75	3002.85	0.10	3002.64	-0.11	-0.046	0.054
3002.30	3002.55	0.25	3002.34	0.04		
3008.95	3009.10	0.15	3008.89	-0.06		
3500.80	3501.05	0.25	3500.66	-0.14	-0.040	0.070
3502.90	3503.35	0.45	3502.96	0.06		
3504.00	3504.35	0.35	3503.96	-0.04		
4004.45	4004.95	0.50	4004.35	-0.10	-0.036	0.054
4001.50	4002.15	0.65	4001.55	0.05		
4002.25	4002.80	0.55	4002.20	-0.05		
4501.25	4501.95	0.70	4501.10	-0.15	-0.066	0.054
4504.05	4504.90	0.85	4504.05	0.00		
4498.55	4499.35	0.80	4498.50	-0.05		
5001.70	5002.60	0.90	5001.47	-0.23	-0.117	0.073
5006.70	5007.80	1.10	5006.66	-0.04		
5001.15	5002.20	1.05	5001.07	-0.08		



Max Std. Uncertainty = 1.897E-01 kg  
 Max.(1Avg.bias+ 1std. Ual)

Appendix B Density measurement for the KRISS reservoir water sample (by the Mass Group of KRISS)

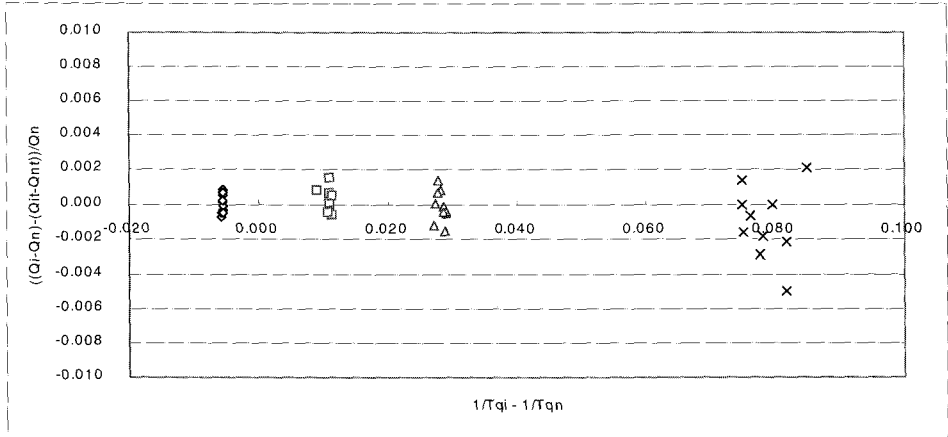
Temperature (Deg. C)	Measurement value of density (g/cm <sup>3</sup> )										average
5	1.00009	1.00009	1.00009	1.00009	1.00008	1.00009	1.00008	1.00008			1.000086
10	0.99980	0.99980	0.99980	0.99980	0.99980	0.99980	0.99981	0.99980	0.99980	0.99980	0.999801
15	0.99922	0.99922	0.99922	0.99922	0.99921	0.99922	0.99922	0.99922	0.99922	0.99922	0.999219
20	0.99833	0.99832	0.99833	0.99833	0.99833	0.99833	0.99833	0.99833	0.99833	0.99833	0.998329
25	0.99717	0.99716	0.99717	0.99717	0.99717	0.99717					0.997168
30	0.99577	0.99577	0.99577	0.99577	0.99577	0.99577	0.99578	0.99578	0.99577	0.99577	0.995770
35	0.99416	0.99417	0.99417	0.99414	0.99417	0.99417	0.99415	0.99417	0.99417	0.99417	0.994167
40	0.99234	0.99235	0.99233	0.99231	0.99231	0.99231	0.99234	0.99235	0.99235	0.99235	0.992340



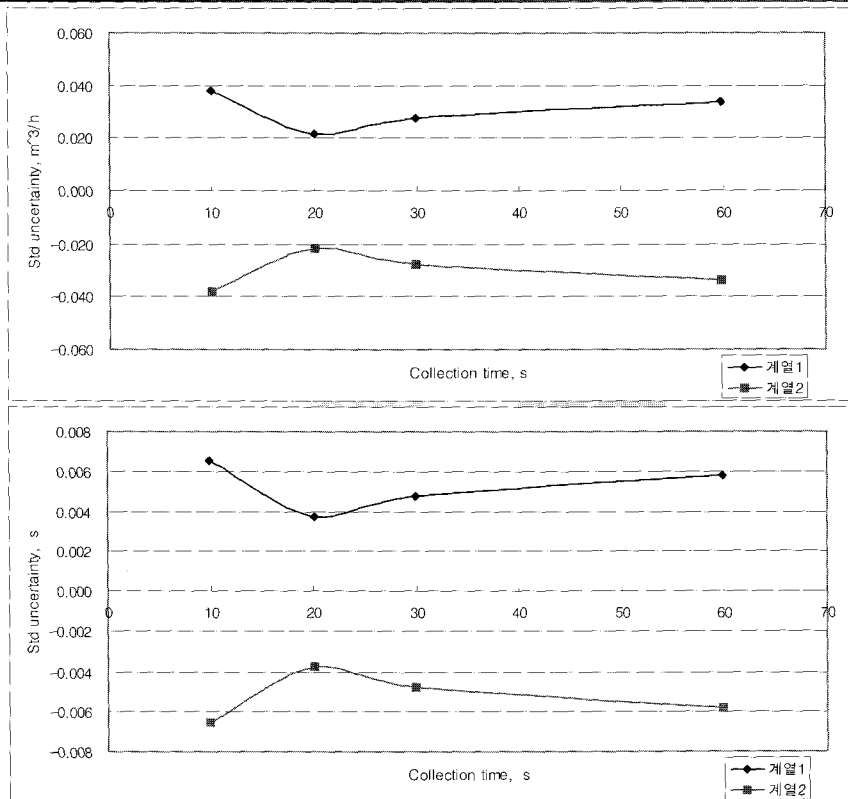


Appendix C Diverter Timing Error Test Result

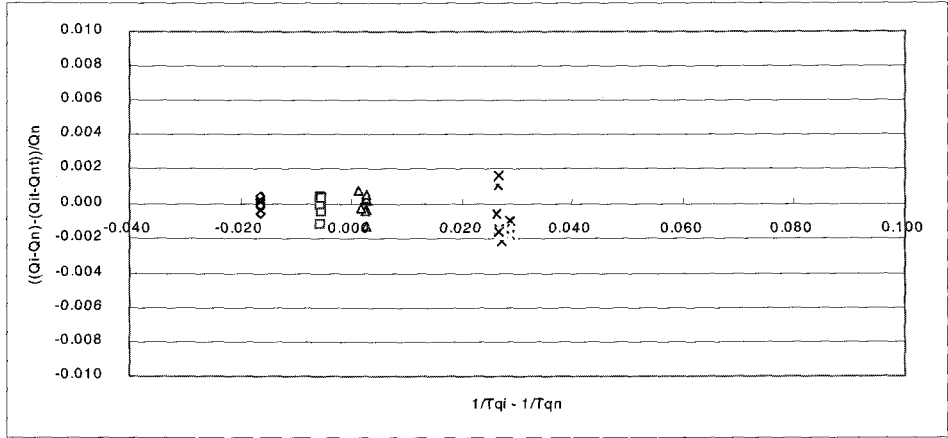
**U - Diverter  $\Delta t$  (5 t, high flowrate)**



**U - Diverter  $\Delta q$  (5 t, high flowrate)**



**U - Diverter  $\Delta t$  (5 t, low flowrate )**



**U - Diverter  $\Delta q$  (5 t, low flowrate )**

