

# 액체용 유량계 교정시스템의 Diverter 불확도 특성 연구

이동근\* · 박종호\*\*

## Uncertainty Characteristics of Diverter for Flowmeter Calibration System

Dong Keun Lee\*, Jong Ho Park\*\*

*Key Words* : Calibration(교정), Diverter(유로전환장치), Uncertainty(불확도), Gravimetric method(중량측정법), Triggering(수집시간 결정행위), Flying start and stop method(유동을 차단하지 않는 측정법)

### ABSTRACT

The diverter system is a key component in achieving a high accuracy liquid flow rate standard using a static gravimetric system with a flying start and stop method. The diverter is a moving device used to direct flow alternately along its normal course(by pass) or towards the weighing tank. The time needed for collection into the weighing tank is measured using a timer. So it is important to the diversion period is sufficiently fast and triggering point of timer which is determined the filling time. On this studies show that uncertainty of diverter system for changing diversion speed and triggering point was estimated in accordance with Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement(ISO).

### 1. 서론

유량계는 산업현장에서 없어서는 안 될 중요한 기기이다. 특히 광역상수도를 포함한 수도시설에서는 정수장의 공정관리나 유수율 제고의 근간이 되는 생산 및 공급량과 사용량 즉 수요자가 수수하는 수량을 정확하게 계측하는 것이 대단히 중요한 일이다. 계측의 정확성과 신뢰성을 확보하기 위하여 사용 중인 유량계는 수도법에 따라 주기적으로 교정 또는 오차시험을 하여야 한다. 교정은 측정의 소급성 유지를 위해 한국인정기구인 KOLAS로부터 KS A ISO/IEC 17025의 규정에 따라 경영 및 기술요건을 충족시킨 국가교정기관에서 실시하고 있다<sup>(1)</sup>.

수자원연구원에는 시설 규모가 국내 최대 규모인

구경  $\phi 800$  mm, 유동율 2,700 m<sup>3</sup>/h까지 교정이 가능한 시스템이 구축되어 있으며 측정방식은 피교정 유량계를

통과한 유체를 수집하고 그 무게를 부피로 환산하여 비교하는 중량측정법과 기준이 되는 정밀한 유량계를 통과한 부피와 피교정 유량계를 통과한 부피를 직접 비교하는 기준유량계법을 병행하고 있다<sup>(2)</sup>. 중량측정법에 의한 교정장치의 불확도는 유동을 정의하는 독립변수 즉, 중량장치에 수집된 중량, 수집시간, 물 밀도, 공기 밀도 및 분동 밀도로부터 정의된다. 그 중에서도 시간측정의 불확도 즉, 유체를 수집하는 시간의 시작과 끝을 결정해주는 트리거링과 유로를 수집위치에서 바이패스로, 바이패스에서 수집위치로 전환시켜주는 유로 전환장치인 다이버터의 동작속도에 의한 불확도가 지배적이다. 따라서 본 연구에서는 수자원연구원의 50톤 중량장치에 대한 불확도 개선을 위해 다이버터의 전환속도와 트리거링 위치를 변경시키면서 실험을 실시하고 불확도가 가장 작은 최적의 조건을 도

\* 한국수자원공사 수자원연구원 (교신저자)

\*\* 충남대학교 기계공학과

E-mail : dongkeun@kwater.or.kr

출하는 등 다이버터와 관련된 설비의 특성을 확인하고자 하였으며, 실험방법은 ISO 4185 규정에 따라 수집 시간을 단계적으로 변화시키면서 실시하였다<sup>(3)</sup>.

## 2. 유량계 교정시스템

### 2.1. 구성요소

#### 2.1.1. 유동발생장치

펌프와 정압유지탱크로 구성되고 펌프는 지하수조에서 정압유지탱크로 송수하기 위해 설치되며 정압유지탱크는 펌프에 의한 맥동 및 지속적인 펌프 흡입수두의 변화로부터 일정하고 안정된 유량 공급과 펌프에서 발생하는 진동이 시험관로에 전달되지 않도록 차단하는 역할을 한다. 펌프는 총 5대(17 m<sup>3</sup>/min×4대, 8.5 m<sup>3</sup>/min×1대)가 설치되어 있다.

#### 2.1.2. 시험관로

구경은 φ800 ~ φ50이며 기준유량계인 전자기유량계와 피교정용 유량계가 설치되고 유동을 충분히 발달시켜 속도분포의 영향을 최소화하기 위하여 기준유량계 상류측에는 직경의 10 배, 피교정유량계는 상류측으로 직경의 50 배, 하류측으로는 10 배의 직관거리가 확보되어 있다. 또한 관로 내부를 흐르는 유체의 온도와 압력을 측정할 수 있도록 온도계와 압력계가 시험관로의 입출구측에 설치되어 있다.

#### 2.1.3. 유동을 조절밸브

시험관로 하류에 설치되어 유량계 교정 시 단계별 유동율을 조절하여 수집탱크로 유입되도록 하는 기능을 하며 공기압 및 전동조작기를 이용하여 유동율을 조절한다.

#### 2.1.4. 중량측정장치

유량계를 통과한 유체를 수집하여 중량을 측정하는 장치로 유로를 전환하는 다이버터를 이용하는 flying start and finish 방법을 채택하였고, 수집탱크, 수집된 질량을 측정하는 로드셀과 분동으로 구성되며 수집탱크는 1 톤, 6 톤, 10 톤, 50 톤의 4 종류가 설치되어 있다. 로드셀은 주기적으로 분동과 물치환법을 이용하여 교정을 한다.

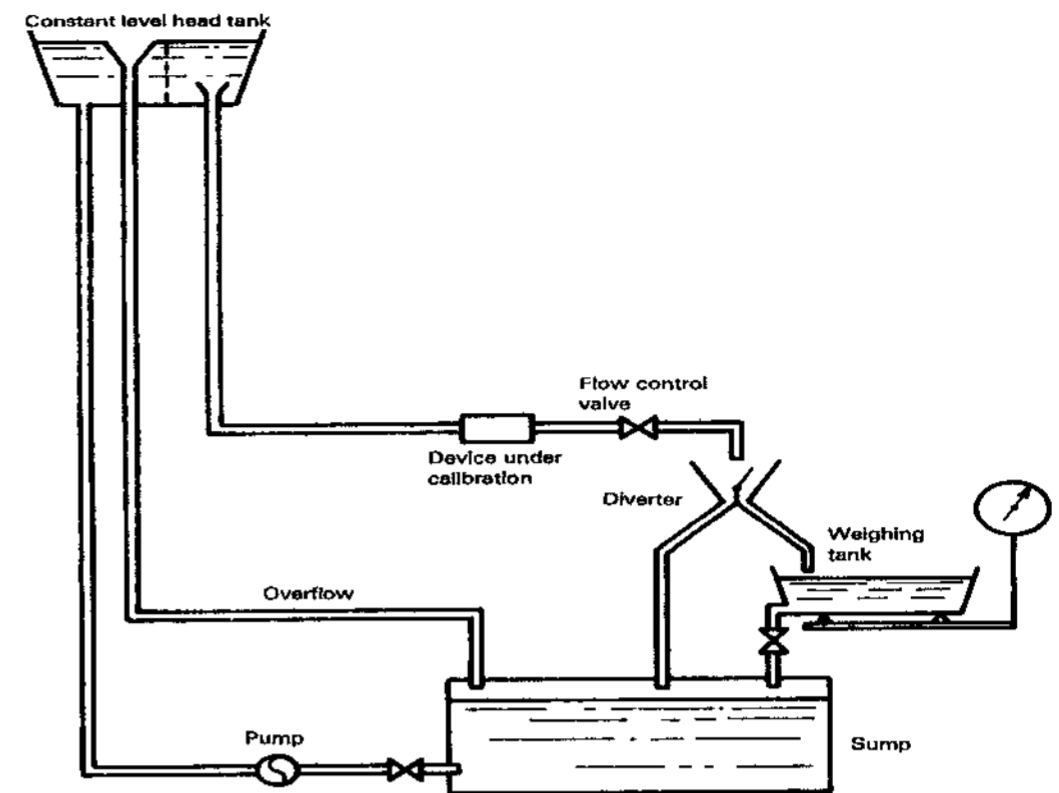


Fig. 1 Schematic diagram of gravimetric flowmeter calibration system

### 2.2. 유량계 교정방법

중량측정에 의해 유량계를 교정하는 방법은 피교정 유량계를 통과한 유체의 중량을 측정하고 이 값을 부피로 환산하여 피교정 유량계의 측정값과 비교하는 방식이다.

Fig. 1은 중량식 유량계 교정장치의 개략도이다. 교정조건을 만족시키기 위해 펌프를 이용하여 지하수조의 유체를 정압유지탱크로 송수하면 유체는 피교정유량계가 설치된 시험관로를 통해 지하수조로 계속 순환되면서 관내의 공기가 제거되어 유동이 안정화된다.

유동이 안정된 후 피교정 유량계의 최대 사용범위를 기준으로 20%, 40%, 60%, 80%, 100%의 5 단계로 구분, 각 단계별 3 회씩 유량시험을 실시한다. 실험결과에 따른 표준불확도와 피교정유량계의 분해능에 따른 불확도를 구하여 교정시스템의 불확도를 합성하면 피교정유량계의 합성불확도를 구할 수 있다<sup>(4)</sup>.

### 2.3. 시스템의 불확도

유량계 교정시스템의 유동율 측정을 위한 수학적 모델은 다음 요소들의 함수로 표현된다<sup>(5)</sup>.

$$q = f(W_{ms}, t, \rho, \rho_a, \rho_p) \quad (1)$$

여기에서,

$q$  : 유량 (m<sup>3</sup>/s)

$W_{ms}$  : 측정된 질량 (kg)

$t$  : 측정된 시간 (s)  
 $\rho$  : 물의 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_a$  : 공기의 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_p$  : 분동의 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)

유동율 계산식은 다음과 같이 표현된다.

$$q = \frac{W_{ms}}{\rho t} \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho}} \quad (2)$$

식 (2)를 테일러 급수 전개를 이용하여 전개하면 그 결과는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} q &= \frac{W_{ms}}{\rho t} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right) \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho}\right) \\ &= \frac{W_{ms}}{\rho t} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p} + \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{\rho_a^2}{\rho \rho_p}\right) \\ &= \frac{W_{ms}}{t} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{\rho_a}{\rho \rho_p} + \frac{\rho_a}{\rho^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_p}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

합성표준불확도를 구하기 위한 불확도 전파법칙은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [C_i u(x_i)]^2 \quad (4)$$

여기에서,

$$\left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) = C_i \text{는 감도계수(Sensitivity coefficient)}$$

식 (4)를 유량계 교정시스템의 수학적 모델식인 식 (1)에 적용하여 합성표준불확도를 구하면 식 (5)와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} u^2(q) &= C^2(W_{ms})u^2(W_{ms}) + C^2(t)u^2(t) \\ &+ C_\rho^2 u^2(\rho) + C_{\rho_a}^2 u^2(\rho_a) + C_{\rho_p}^2 u^2(\rho_p) \end{aligned} \quad (5)$$

따라서, 유량계 교정시스템의 합성표준불확도는 식 (3)을 식 (5)에 대입하고 유동율에 영향을 미치는 각 인자별로 편미분하면 식(6)과 같이 된다.

Table 1 Uncertainty Budget

Variable $X_i$	Standard. Uncertainty $u(x_i)$	Sensitivity Coefficient $c_i$	Contribution Value $u_i(q)$
$W_{ms}$ (kg)	8.27	$1.67 \times 10^{-5}$	$1.38 \times 10^{-4}$
$t$ (s)	$8.70 \times 10^{-2}$	$-1.25 \times 10^{-2}$	$-1.09 \times 10^{-3}$
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$2.89 \times 10^{-4}$	$-7.51 \times 10^{-4}$	$-2.17 \times 10^{-7}$
$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	$2.22 \times 10^{-4}$	$6.53 \times 10^{-4}$	$1.45 \times 10^{-7}$
$\rho_p$ (kg/m <sup>3</sup> )	$2.89 \times 10^{-1}$	$1.47 \times 10^{-8}$	$4.23 \times 10^{-9}$
$q$ (m <sup>3</sup> /h)			3.95

$$\begin{aligned} u^2(q) &= \left[ \frac{1}{t} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{\rho_a}{\rho \rho_p} + \frac{\rho_a}{\rho^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_p} \right) \right]^2 \times u^2(W_{ms}) \\ &+ \left[ -\frac{W_{ms}}{t^2} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{\rho_a}{\rho \rho_p} + \frac{\rho_a}{\rho^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_p} \right) \right]^2 \times u^2(t) \\ &+ \left[ \frac{W_{ms}}{t} \left( -\frac{1}{\rho^2} + \frac{\rho_a}{\rho^2 \rho_p} - \frac{2\rho_a}{\rho^3} + \frac{2\rho_a^2}{\rho^3 \rho_p} \right) \right]^2 \times u^2(\rho) \\ &+ \left[ \frac{W_{ms}}{t} \left( -\frac{1}{\rho \rho_p} + \frac{1}{\rho^2} - \frac{2 \times \rho_a}{\rho^2 \rho_p} \right) \right]^2 \times u^2(\rho_a) \\ &+ \left[ \frac{W_{ms}}{t} \left( \frac{\rho_a}{\rho \rho_p^2} + \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_p^2} \right) \right]^2 \times u^2(\rho_p) \end{aligned} \quad (6)$$

50 톤 수집탱크에 2,700 m<sup>3</sup>/h의 유동율로 60 s 동안 수집하여 불확도를 산출한 결과는 Table 1과 같다. 즉, 2,700 m<sup>3</sup>/h에 대한 불확도는 3.95 m<sup>3</sup>/h 이고 이 값을 신뢰수준 약 95%에서의 확장불확도로 나타내면 0.3%이며 이 값이 교정시스템의 최고측정능력이다.

### 3. 다이버터 성능평가

#### 3.1. 측정원리

다이버터는 중량측정방식을 사용하는 유량계 교정시스템의 측정능력을 좌우하는 가장 중요한 설비라 하더라도 결코 과언이 아니다. 다시 말하면 다이버터에 의해 시스템의 측정능력이 결정된다는 것을 의미한다. 다이버터의 구조는 Fig. 2와 같이 두개의 독립된 유로를 붙여놓은 강철제이며 중앙의 회전축을 중심으로 회전하면서 한쪽은 수집탱크로 반대쪽은 지하 저장조로 유체가 흐르도록 안내하는 역할을 한다. 다이버터가 동작하여 노즐 출구에서 분출되는 유동을 횡단할 때 유체는 짧은 시간동안 수집탱크와 지하 저장조로 나누

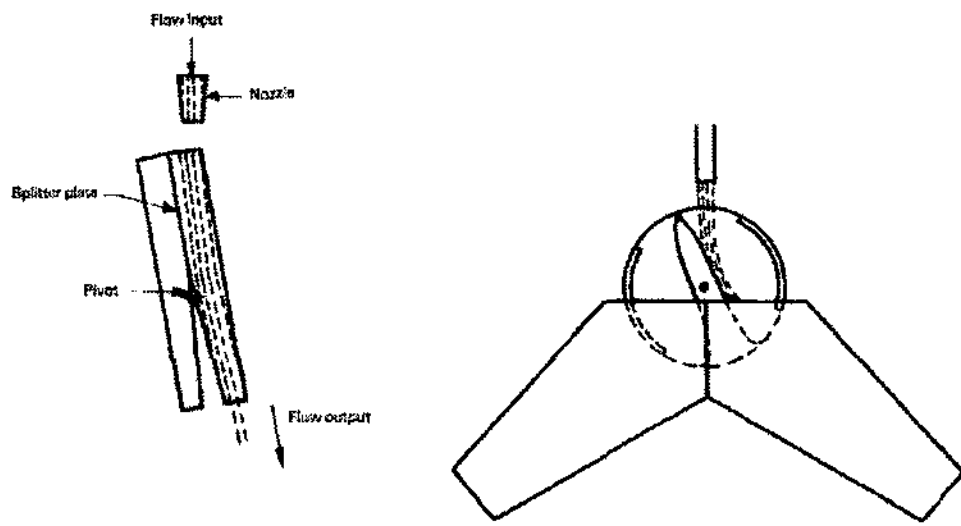


Fig. 2 Principle of diverter

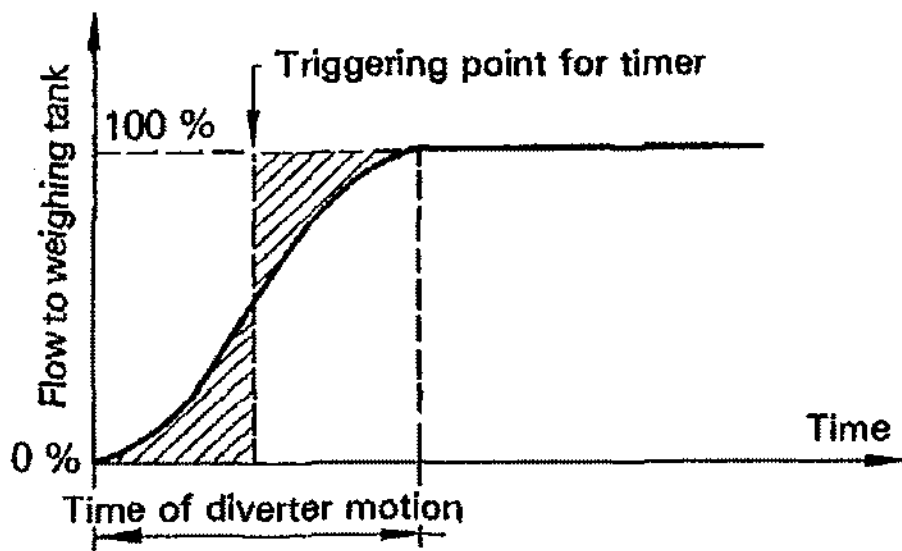


Fig. 3 Operational law of diverter

어 흐르게 되는 구간이 반드시 존재하게 된다. 따라서 노즐에서 분출되는 유동이 정확히 나누어지는 시점 즉 유동의 중심에서 트리거링(triggering)이 되면 시간편차가 사라진다.

Fig. 3은 다이버터가 동작하면서 수집탱크에 들어가는 유체의 유량이 증가하는 모습을 나타낸 것으로 횡축은 다이버터 동작시간, 종축은 수집탱크로 들어가는 유동이며 트리거링 포인트를 중심으로 양쪽의 빗금친 면적이 동일하면 가장 이상적인 세팅이라고 할 수 있다. 그러나 이것은 이상적인 경우이며 실제로는 노즐에서 분출되는 유동의 중심을 결정하기는 상당히 어려운 일이므로 ISO 4185 규정의 부속서에 따라 시간측정을 보정한다<sup>(3)</sup>.

### 3.2. 시간측정의 불확도 평가

#### 3.1.1. 평가요소

시간측정 불확도는 시간을 계측하는 타이머의 불확도와 다이버터의 불확도로 나눌 수 있다. 그리고 다이버터의 불확도는 다이버터가 유동의 중심 위치에서 정확히 수집시작점과 종료점을 트리거하지 못 하는 것에 의한 시간편차와 이 트리거링의 재현성으로 나눈다. 타이머의 불확도는 다이버터의 불확도에 비해 무시할 수 있을 정도로 아주 작으며, 이는 타이머의 교정성적

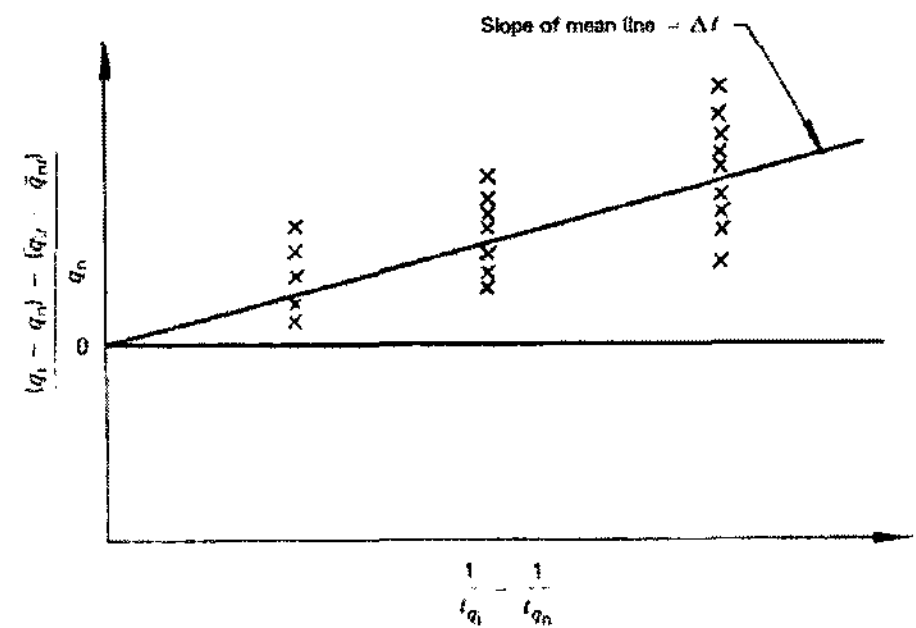


Fig. 4 Plotting of results of diverter timer

서에서 쉽게 얻을 수 있다. 시간측정의 불확도는 식 (7), 다이버터의 불확도는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$u(t) = \sqrt{(u(t)_{diverter})^2 + (u(t)_{timer})^2} \quad (7)$$

$$u(t)_{diverter} = \sqrt{\Delta t^2 + (u(t)_{diverter_A})^2} \quad (8)$$

- 여기에서,  $u(t)_{diverter}$  : 다이버터의 불확도
- $u(t)_{timer}$  : 타이머의 불확도
- $\Delta t$  : 다이버터의 시간편차
- $u(t)_{diverter_A}$  : 다이버터의 반복성

#### 3.1.2. 다이버터의 시간편차( $\Delta t$ )

다이버터 시스템이 이상적으로 설계되었다면 다이버터 동작에 따라 타이머를 작동 및 정지시키는 동작 즉 시간측정의 오차는 무시할 수 있다. 그러나 이 오차는 유동을, 다이버터의 전환속도, 노즐 출구에서의 유동 형태의 변화 및 트리거링 위치의 정확한 세팅 여부에 따라 좌우되므로 반드시 보정을 하여야 한다. 즉, 시간측정의 불확도는 교정시스템의 불확도 산출시 고려하여야 한다. 시간측정에 대한 불확도를 산출하기 위하여 유동율은 시스템의 최대 유동율에 근접하도록 밸브를 조절하여 세팅한 후 기준 수집시간과 기준의 20%, 10%, 5%의 짧은 시간으로 수집한 후 식 (9)를 이용하여 오차를 산출한다.

$$\Delta t \left( \frac{1}{t_{qi}} - \frac{1}{t_{qn}} \right) = \frac{(q_i - q_n) - (\bar{q} - \bar{q}_{nt})}{q_n} \quad (9)$$

- 여기에서  $t_{qi}$  : 짧은 수집시간
- $t_{qn}$  : 기준 수집시간

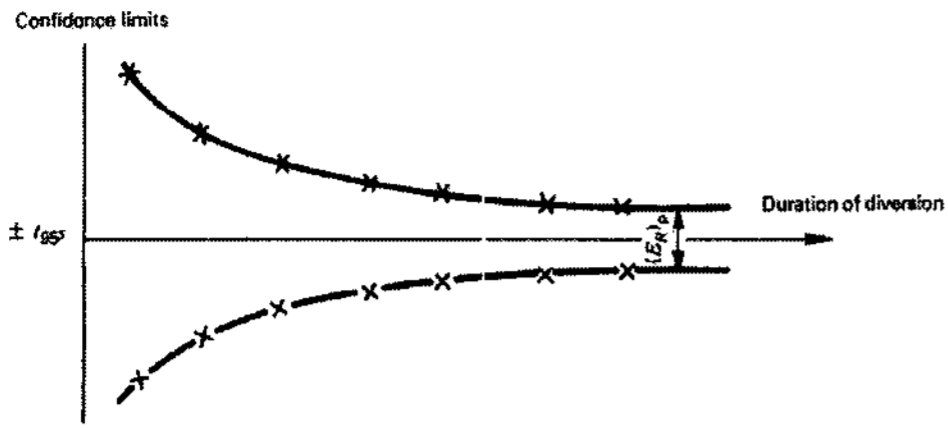


Fig. 5 Typical graph of repeatability for diverter system

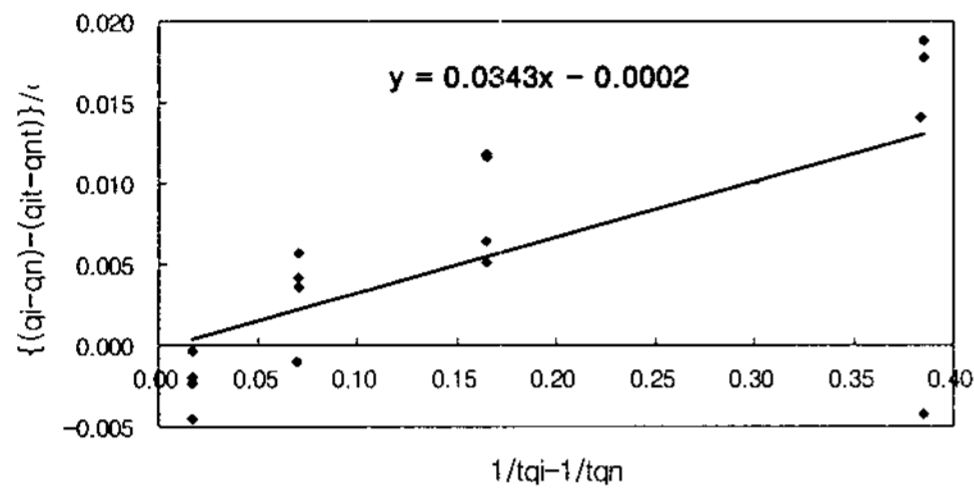


Fig. 6 Test result of diverter for original

- $q_i$  : 짧은시간동안 계산된 유동율
- $q_n$  : 기준시간동안 계산된 유동율
- $\bar{q}$  : 짧은시간동안 유량계의 평균 유동율
- $\bar{q}_{nt}$  : 기준시간동안 유량계의 평균 유동율

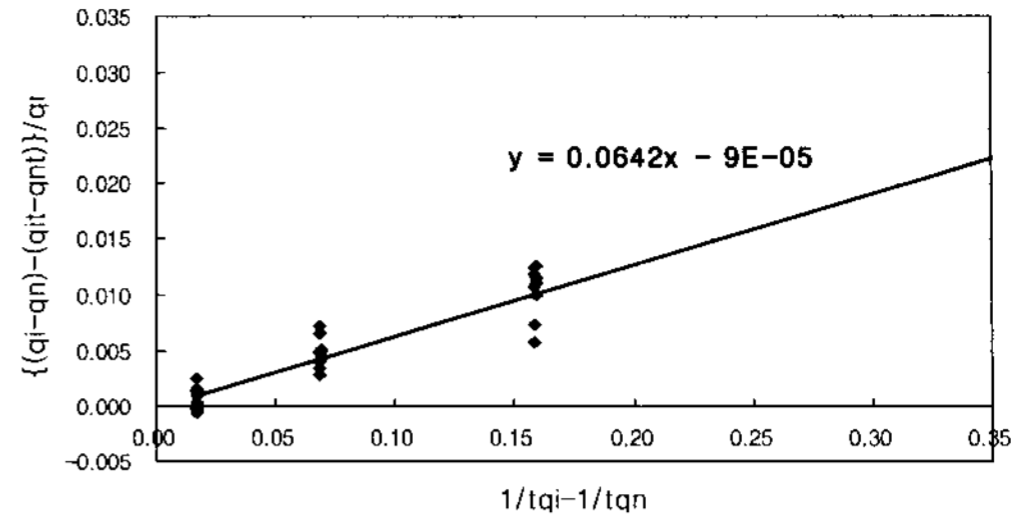
실험결과를 나타내기 위하여 식 (9)의 오른쪽 항인 유동율 편차는 세로축, 왼쪽 항의 시간편차는 가로축으로 잡아 그래프를 그리면 Fig. 4와 같이 그려진다. 여기에서 평균선의 기울기는 원점을 지나는 직선으로 표현되며 불확도가 작아질수록 이 기울기는 수평축과 평행을 이루게 된다.

### 3.1.3. 다이버터의 반복성 불확도

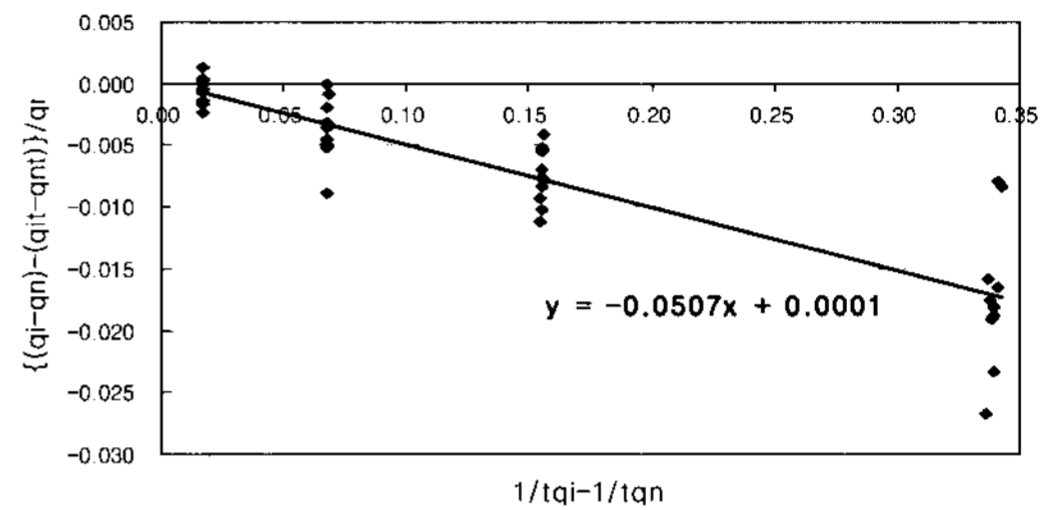
다이버터 시스템으로 인한 반복성의 불확도는 시간계를 구동시키는 다이버터 움직임의 반복성과 시간계를 작동시키는 트리거링 위치의 정밀도에 의해 좌우된다. 유동율은 시스템의 조절밸브와 기준유량계를 사용하여 안정된 상태로 유지시킨 후 주어진 전환시간에 10회의 실험을 실시하며 전환시간은 여러 번 변경하여 반복적으로 실험을 한다. 다이버터 시스템이 잘 설계되었다면 Fig. 5와 같은 그래프가 그려진다.

## 4. 실험결과

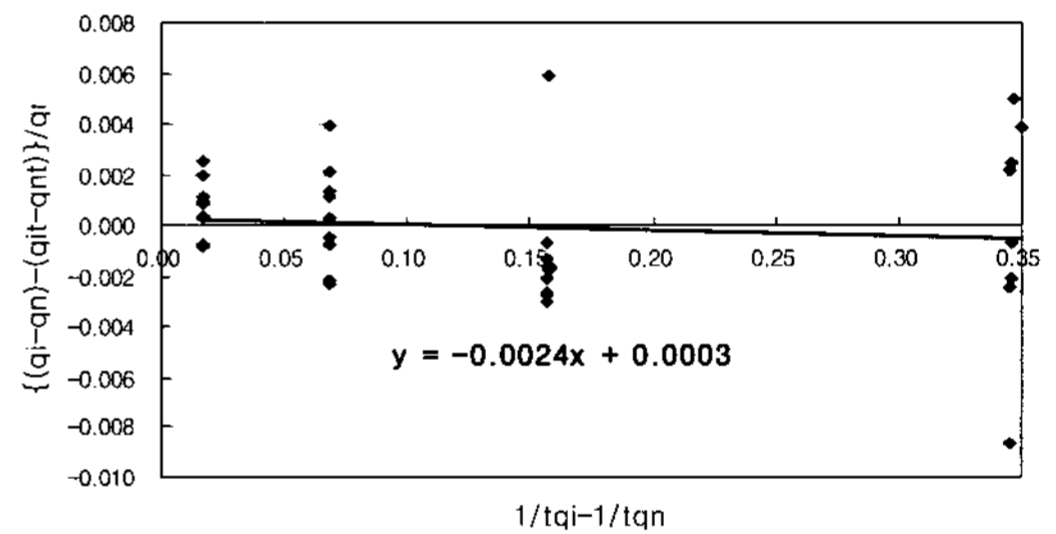
실험대상 설비는 수자원연구원이 보유하고 있는 교



(a) 8 cm of triggering position



(b) 9 cm of triggering position



(c) 8.5 cm of triggering position

Fig. 7 Test result of 0.48 s for diversion time

정시스템 중 최대 규모인 50 톤용 중량측정장치를 대상으로 하였다. 실험은 다이버터의 전환속도와 유체를 수집하는 시작과 끝을 결정해주는 트리거링 위치를 조합하여 실험을 하고 속도 및 위치와의 상관관계를 알아보았으며 실험횟수는 최대유동율에서 속도 2인자, 위치 3인자를 조합하여 총 6 회를 실시하였다. 다이버터가 유체를 수집과 바이패스하기 위하여 왕복하는 시간을 측정하기 위한 시간측정장치를 제작하여 왕복시간을 같게 세팅하였다. Fig. 6은 2006.11 한국인정기구로부터 국가교정기관으로 인정받았을 당시의 50 톤 다이버터에 대한 시간 불확도이며, 가로축은 시간편차비, 세로축은 유량편차 비를 나타낸다. 각 전환시간의 평균값을 연결한 추세선의 기울기는 0.0343을 나타내고 있다. 이 값의 의미는 다이버터의 트리거링이 노즐에서 분출되는 유동의 중심 즉, 유량계가 취득하는 필

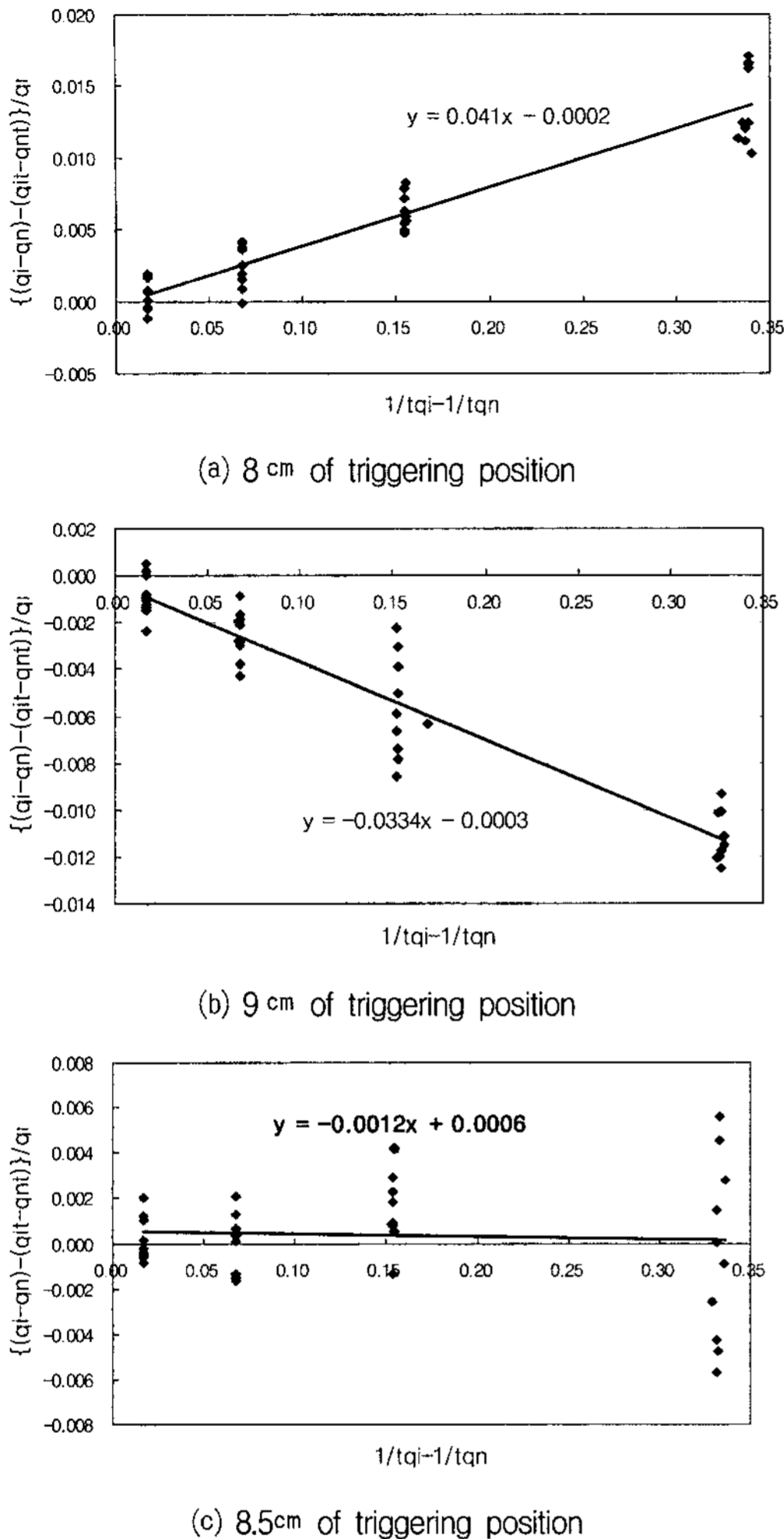


Fig. 8 Test result of 0.37 s for diversion time

스 신호보다 0.0343 s 늦다는 것을 나타낸다.

Fig. 7은 다이버터의 동작속도가 0.48 s일 경우에 트리거링용 센서의 위치를 변화시킴에 따른 시간측정의 불확도를 추세선의 기울기로 표현하였다. 센서의 위치에 따라 불확도가 다르게 나타나는 것을 알 수 있으며 Fig. 7의 (c)는 센서의 위치가 기준면에서 8.5 cm 높이 일 때 0.0024 s 빠르게 트리거링이 되어 가장 정확한 것을 나타낸다. Fig. 8은 다이버터의 동작속도가 0.37 s 일 경우로 0.48 s의 경우와 마찬가지로 센서의 높이가 8.5 cm일 때 트리거링이 0.0012 s 빠른 것을 보여주고 있다. Figs. 7과 8을 비교해 보면 다이버터의 전환속도가 빠를수록 추세선의 기울기가 횡축에 가까워지므로 시간 불확도가 줄어드는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

중량식 유량계 교정시스템은 그 정확성이 우수하여 국가표준기관인 한국표준과학연구원에 설치되어 있으며 국가교정기관은 시스템을 구축하는 비용 문제로 대부분이 기준유량계법을 선호하고 있다. 그러나 수자원연구원은 유량측정분야의 선도적인 역할로 산업계의 기술발전에 기여하고자 중량식 교정시스템을 설치, 관리하고 있으나 스윙식(swing type) 다이버터를 적용하여 왕복운동에 의한 불확도가 크게 나타날 수밖에 없는 구조로 되어있다<sup>(6)</sup>. 따라서 스윙식 다이버터가 설치된 중량측정에 의한 유량계 교정시스템의 불확도에 지배적인 영향을 주는 유체의 수집시간과 관련된 시간측정의 불확도를 줄이기 위하여 다이버터의 동작속도와 트리거링 위치의 변화를 조합하여 반복적인 실험을 실시하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다이버터의 동작속도를 빠르게 할수록 불확도를 줄일 수 있으나 설비의 대형화에 따른 구조적인 제약으로 그 한계가 있음을 확인하였다.
- (2) 트리거링 위치가 정확할수록 즉, 노즐에서 분출되는 유동의 중심에 가까워질수록 불확도는 줄어든다.

## 참고문헌

- (1) ISO/IEC 17025, 2005, "General requirements for the competence of testing and calibration laboratory."
- (2) 한국수자원공사, 2004, "국제상하수도교육센터 건립 공사 실시설계보고서."
- (3) ISO 4185, 1980, "Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits-Weighing Methods."
- (4) ISO, 1993, "Guide to The expression of uncertainty in measurement (1st edition)."
- (5) 임기원, 2001, "유량계 교정장치의 측정불확도에 관한 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제25권 제 4호, pp. 561~571.
- (6) T. Shimada, S. Oda, Y. Terao, M. Takamoto, 2003, "Development of a new diverter system for liquid flow calibration facilities," Flow Measurement and Instrument 14, pp. 89~96