

## 수위계 표준시험장치의 최고측정능력 산출

신강욱, 홍성택  
한국수자원공사 수자원연구원

### The Best Measurement Capability for the Standard Test Facility of Water-Level Gauges

Gang\_wook Shin, Sung-Taek Hong  
KOWACO KIWE

**Abstract** - 댐 및 저수지 운영에 필수 요소인 수위 데이터의 신뢰성을 높일 수 있도록 수위측정에 가장 많이 사용되고 있는 부자식, 초음파식, 레이더식 수위계의 특성시험이 가능한 표준시험장치와 표준시험장치에 대한 운영의 일관성을 확보하기 위한 표준시험절차를 개발하였다. 또한, 표준시험장치의 최고측정능력을 산출하여 수위계 시험에 따른 불확도를 산출할 수 있도록 수위 측정 모델식을 제시하여 합성불확도 1.408 mm와 확장불확도 3 mm를 각각 얻었다. 본 연구에서 제시된 최고측정능력은 수위데이터의 신뢰성 있는 자료 확보와 일관성 있는 자료관리가 가능하도록 품질관리 기반을 구축하였다.

#### 1. 서 론

댐이나 저수지 운영에서 가장 중요한 데이터는 우량 및 수위 데이터이며, 홍수기 뿐만 아니라 평상시에도 중요한 자료로 활용되고 있다. 현재 우리나라에서는 수문관측 시설로 이용되고 있는 우량관측국은 약 3,000 여개소, 수위관측국은 약 600 여개소를 한국수자원공사를 비롯한 건설교통부, 기상청 등에서 설치·운영중에 있다.

우량관측국의 센서인 우량계에 대해서는 기상표준화법이 정한 교정주기에 의하여 교정 및 검정을 실시하여 센서의 관리 및 성능유지에 세심한 주의를 기울이고 있는 반면, 수위관측국의 센서인 수위계에 대해서는 유지관리는 어느 정도 이루어지고 있으나, 센서의 정확도 여부를 판단할 수 있는 검정이나 보정 등의 행위는 한번 설치된 이후에는 이루어 지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 댐 운영에 가장 많이 사용되고 있는 접촉식 수위계인 부자식수위계와 비접촉식 수위계인 초음파식 수위계 및 레이더식 수위계에 대한 특성시험 및 보정이 가능하도록 수위계 표준시험장치와 표준 시험절차를 개발하였다. 또한, 본 연구에서 개발된 수위계 표준 시험장치의 최고측정능력을 산출하기 위하여 표준시험장치의 불확도 구성인자를 도출하고 모델식을 제시하여 3 mm 최고측정능력을 얻었다.

이를 바탕으로 댐 운영에 중요한 데이터로 활용되고 있는 수위데이터의 신뢰성 있는 자료 확보와 일관성 있는 자료관리가 가능하도록 품질관리 기반을 구축하였다.

#### 2. 수위계 표준시험장치

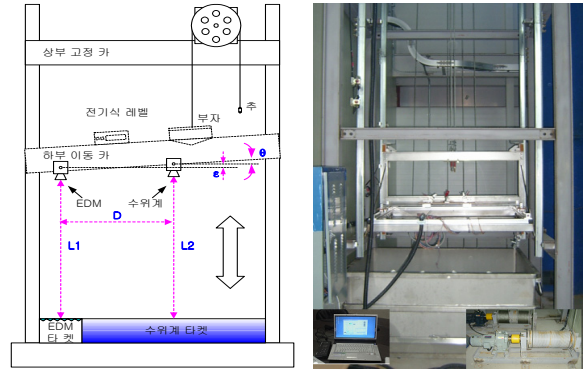
##### 2.1 하드웨어 구성

수자원연구원에서는 레이저 측정기(EDM : electro-optic distance meter)를 이용하여 대상 수위계의 지시값을 상호 비교하는 방법으로 그림 1과 같이 구성된 수위계 표준시험장치를 개발하였으며, 접촉식 수위계인 부자식 수위계와 비접촉식 수위계인 초음파식 및 레이더식 수위계를 대상으로 시험할 수 있도록 하였다.

그림 1에서 알 수 있는바와 같이 부자식 수위계를 시험할 경우 수위계의 풀리를 운반할 수 있는 상부 리프트와 부자를 이동할 수 있는 하부 리프트로 구성되어 있다. 부자와 같은 하부 리프트에 설치된 레이저 측정기와 레벨계를 이용하여 리프트의 이동에 따른 EDM의 지시값과 부자식 수위계의 지시값을 비교하고, 레벨계의 값은 리프트의 기울어짐 효과를 보정하기 위하여 사용된다.

비접촉식 수위계인 초음파식과 레이더식 수위계에 대한 표준시험장치 구성은 EDM을 대상 수위계와 함께 리프트에 설치한 후, 리프트를 수직으로 이동시키면서 대상 수위계와 EDM의 지시값을 동시에 읽어 비교함으로써 시험하도록 구성하였다.

EDM과 수위계의 기준 높이를 정확히 일치시키고, EDM의 타겟(Target)과 물의 높이를 정확히 일치시켜야 한다는 어려움이 있으나, 비접촉식 수위계의 경우에 있어서 접촉식과 같이 물의 수위를 변화시키는 대신, 수위계를 이송시키는 방법으로 수위가 변하는 효과를 얻도록 구성하였다.

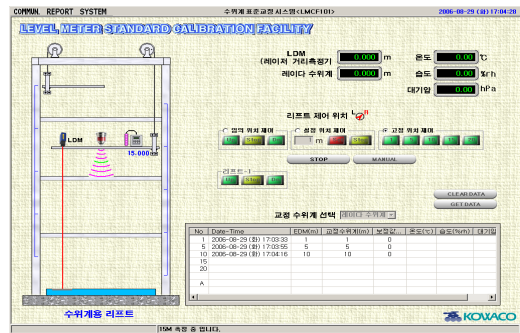


〈그림 1〉 수위계 표준시험장치의 개략도 및 구성도

##### 2.2 소프트웨어 구성

그림 2는 수위계 표준시험장치를 운영하기 위한 소프트웨어의 초기화면으로서, 세부적인 소프트웨어의 기능은 자동으로 시험절차에 따라 데이터를 취득하는 기능과 표준시험장치로부터 불확도 계산에 필요한 요소인 EDM, 피교정 수위계, 레벨계, 환경측정 센서 등을 읽어 들여 불확도를 계산하는 기능, 그리고 불확도의 계산이 완료되면 출력양식에 맞추어 결과를 출력하는 기능, 그리고 시험이 진행중이거나 끝난 후 또는 불확도 계산 후에 취득된 데이터를 저장하며 자동으로 파일을 생성시키는 기능이 있다.

또한, 피교정 수위계의 수위값과 리프트를 제어하기 위한 PLC의 운영 프로그램을 Ladder로 개발하였다.



〈그림 2〉 표준시험장치 초기화면

#### 3. 최고측정능력 산출

##### 3.1 모델식

이동 리프트가 상하 운동을 하면서 기울어질 수 있는 현상이 발생될 경우 EDM과 수위계의 기준 높이를 정확히 일치시키기 위하여 레벨계를 설치하여 이동시 발생하는 경사각에 따른 측정오차를 보정하도록 하였다.

리프트가 이송 중에 경사각이  $\theta$  인 경우, 그림 1과 같이, 수위계는  $\epsilon$  만큼 더 큰 값을 측정하는 오류를 발생하게 된다. EDM과 수위계의 중심 거리를  $d$ 라고 하면, 이 측정 오차는

$$\epsilon = d \times \tan \theta \quad (1)$$

이며, 수위계의 지시값  $L_2$  에 대한 보정값  $b$ 는 다음과 같이 구한다.

$$b = (l_1 + \epsilon) - l_2 \quad (2)$$

식 (2)에 식 (1)을 대입하여 정리하면

$$b = l_1 + d \times \tan \theta - l_2 \quad (3)$$

여기서,  $b$  : 보정값 (m)

$l_1$  : EDM의 지시값 (m)

$d$  : EDM과 피고정수위계와의 거리 (m)

$\theta$  : EDM과 피고정수위계와의 기울기( $^\circ$ ), (+ : 수위계>EDM)

$l_2$  : 수위계의 지시값 (m)

### 3.2 불확도 산출

최고측정능력이란 규정된 시험실 조건하에서 기 확립된 교정 또는 교정 유형에 대하여 교정기관이 달성할 수 있는 최소의 측정불확도를 말한다.

수위계 표준시험장치의 표준불확도 계산을 위한 모델식은 식 (3)이며, 불확도 전파법칙에 따라 이의 합성 표준불확도는 다음 식 (4)와 같이 주어진다.

$$u_c(b) = \sqrt{\left(\frac{\partial b}{\partial l_1} u(l_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial d} u(d)\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial \theta} u(\theta)\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial l_2} u(l_2)\right)^2} \quad (4)$$

여기서,  $u(l_1)$  : EDM의 지시값 (m)에 따른 불확도

$u(d)$  : EDM과 피고정수위계와의 거리에 따른 불확도

$u(\theta)$  : EDM과 피고정수위계와의 기울기에 따른 불확도

$u(l_2)$  : 수위계의 지시값 (m)에 따른 불확도

각 불확도 성분의 표준불확도, 감도계수, 불확도 기여량 및 자유도를 계산하면 표 1의 불확도 총괄표와 같으며, 이 값들이 나오기 위한 계산 내역은 다음과 같다.

표 1 불확도 총괄표

	1	2	3	4	5	6
입력량 $X_i$	추정값 $x_i$	표준불확도 $u(x_i)$	확률분포	감도계수 $c_i$	불확도기여량 $u_i(y)$	자유도 $\nu_i$
A	$l_1$ 14.926 m	0.789	정규	1.0	0.789	$\infty$
B	$d$ 0.725 m	0.297	t	0.005	0.001 49	$\infty$
C	$\theta$ $0^\circ$	0.001	정규	725.02	0.725	$\infty$
D	$l_2$ 15.491 m	0.913	t	-1.0	0.913	$\infty$
E	$b$				1.408	$\infty$

(1) A1 : 반복측정에 의한 거리 측정 평균값

EDM을 이용한 5회 반복측정 결과에 대한 측정 결과 가운데, 측정 거리에 대한 측정결과는 아래 표와 같다.

(단위 : m)

EDM의 측정값					평균값	실험 표준편차
1회	2회	3회	4회	5회		
14.926	14.926	14.926	14.926	14.926	14.926	0

(2) A2 : EDM의 불확도,  $u(l_1)$

- EDM의 교정 불확도,  $u(l_{1.r})$

교정성적서에 의하면 EDM의 확장불확도는, 신뢰수준 약 95 %,  $k = 2$ 인 경우에,  $\sqrt{1.4^2 + 0.03^2 \cdot L^2}$  mm ( $L$  : m)이므로, 측정거리 14.573 m에 대하여,

$$u(l_{1.w}) = \frac{\sqrt{1.4^2 + 0.03^2 \cdot L^2}}{2} = \frac{\sqrt{1.4^2 + 0.03^2 \cdot 14.573^2}}{2} = 0.374 \text{ mm}$$

- EDM 사용시 분해능으로 인한 불확도,  $u(l_{1.r})$

실 사용자는 EDM 자체의 분해능에 의존하여 판독할 수밖에 없으므로, 이 분해능에 의한 불확도는, 이 값을 직사각형 확률분포의 너비로 추정하여 구한다.

$$u(l_{1.r}) = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0.289 \text{ mm}$$

- EDM의 우연효과에 의한 불확도,  $u(l_{1.a})$

EDM을 이용한 5회 반복측정 결과에 대한 측정 결과는 A1의 표를 사용하며, 측정결과에서 실험표준편차는 0 mm이므로, 반복성으로부터의 우연효과에 의한 표준불확도  $u(l_{1.a})$ 는

$$u(l_{1.a}) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0}{\sqrt{5}} = 0 \text{ mm}$$

$\therefore$  EDM의 불확도  $u(l_1)$ 는

$$u(l_1) = \sqrt{u(l_{1.w})^2 + u(l_{1.r})^2 + u(l_{1.a})^2} = \sqrt{0.734^2 + 0.289^2 + 0^2} = 0.789 \text{ mm}$$

(3) A3 : 정규분포

(4) A4 : 식 (3)을  $b$ 에 대하여 편미분하면  $\frac{\partial b}{\partial l_1} = 1.0$

(5) A5 : 표준불확도  $\times$  감도계수 이므로  
 $A2 \times A4 = 0.789 \times 1.0 = 0.789 \text{ mm}$

$$(6) A6 : \nu_{L_1} = \frac{u_i^4(l_1)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(l_1)}{\nu_i}} = \frac{0.789^4}{\frac{0.734^4}{\infty} + \frac{0.289^4}{\infty} + \frac{0^4}{4}} = \infty$$

(7) B1 : 0.725 mm

(8) B2 : EDM과 수위계에 대한 반복측정에 의한 거리 불확도,  $u(d)$   
- 곧은자의 교정 불확도,  $u(d_w)$

교정성적서에 의하면 곧은자의 확장불확도는, 신뢰수준 약 95 %,  $k = 2$ 인 경우에, 0.14 mm이므로

$$u(d_w) = \frac{0.14}{2} = 0.07 \text{ mm}$$

- 곧은자 사용시 분해능으로 인한 불확도,  $u(d_r)$

실 사용자는 곧은자 자체의 분해능에 의존하여 판독할 수밖에 없으므로, 이 분해능에 의한 불확도는, 이 값을 직사각형 확률분포의 너비로 추정하여 구한다.

$$u(d_r) = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0.289 \text{ mm}$$

- 곧은자의 우연효과에 의한 불확도,  $u(d_a)$

곧은자를 이용한 5회 반복측정 결과에 대한 측정 결과는 아래 표와 같다.

(단위 : m)

곧은자의 측정값					평균값	실험 표준편차
1회	2회	3회	4회	5회		
0.725	0.725	0.725	0.725	0.725	0.725	0

측정결과에서 실험표준편차는 0 mm이므로, 반복성으로부터의 우연효과에 의한 표준불확도  $u(d_a)$ 는

$$u(d_a) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0}{\sqrt{5}} = 0 \text{ mm}$$

$\therefore$  곧은자의 불확도  $u(d)$ 는

$$u(d) = \sqrt{u(d_w)^2 + u(d_r)^2 + u(d_a)^2} = \sqrt{0.07^2 + 0.289^2 + 0^2} = 0.297 \text{ mm}$$

(9) B3 : t분포

(10) B4 : 식 (3)을 편미분하여 구하면  $\frac{\partial b}{\partial d} = \tan \theta$

여기서,  $\theta$ 의 최대값 0.3을 적용하면

$$\frac{\partial b}{\partial d} = \tan \theta = \tan(0.3) = 0.005$$

(11) B5 : 표준불확도  $\times$  감도계수 이므로

$$B2 \times B4 = 0.297 \times 0.005 = 0.001 49 \text{ mm}$$

$$(12) B6 : \nu_D = \frac{u_i^4(d)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(d)}{\nu_i}} = \frac{0.297^4}{\frac{0.07^4}{\infty} + \frac{0.289^4}{\infty} + \frac{0^4}{5}} = \infty$$

(13) C1 :  $0^\circ$

(14) C2 : EDM과 수위계에 대한 반복측정에 의한 기울기 불확도,  $u(\theta)$

- 레벨계의 교정 불확도,  $u(\theta_w)$

교정성적서에 의하면 레벨계의 확장불확도는, 신뢰수준 약 95 %,  $k = 2$ 인 경우에,  $0.11^\circ$ 이므로

$$u(\theta_w) = \frac{0.11}{2} = 0.055 = 9.599 \times 10^{-4} \text{ rad.}$$

- 레벨계 사용시 분해능으로 인한 불확도,  $u(\theta_R)$

실 사용자는 레벨계 자체의 분해능에 의존하여 판독할 수밖에 없으므로, 이 분해능에 의한 불확도는, 이 값을 직사각형 확률분포의 너비로 추정하여 구한다.

$$u(\theta_R) = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} = 0.003 = 5.236 \times 10^{-5} \text{ rad.}$$

- 레벨계의 우연효과에 의한 불확도,  $u(\theta_A)$

레벨계를 이용한 5회 반복측정 결과에 대한 측정 결과는 아래 표와 같다.

(단위 : °)

레벨계의 측정값					평균값	실험 표준편차
1회	2회	3회	4회	5회		
-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	0

측정결과에서 실험표준편차는 0°이므로, 반복성으로부터의 우연효과에 의한 표준불확도  $u(\theta_a)$ 는

$$u(\theta_a) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0}{\sqrt{5}} = 0^\circ \text{ rad.}$$

∴ 레벨계의 불확도  $u(\theta)$ 는

$$u(\theta) = \sqrt{u(\theta_w)^2 + u(\theta_r)^2 + u(\theta_a)^2} = \sqrt{(9.599 \times 10^{-4})^2 + (5.236 \times 10^{-5})^2 + 0^2} = 1 \times 10^{-3}$$

(15) C3 : 정규분포

(16) C4 : 식 (3)을 편미분하여 구하면  $\frac{\partial b}{\partial \theta} = \frac{d}{\cos^2 \theta}$

여기서,  $\theta$ 의 최대값 0.3을 적용하고,  $d$ 의 최대값 725 mm를 적용하면

$$\frac{\partial b}{\partial \theta} = \frac{d}{\cos^2 \theta} = \frac{725}{\cos^2(0.3)} = 725.02 \text{ mm}$$

(17) C5 : 표준불확도 × 감도계수 이므로

$$C2 \times C4 = 0.001 \times 725.02 = 0.725 \text{ mm}$$

(18) C6 :

$$\nu_0 = \frac{u_\theta^4(\theta)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(\theta)}{\nu_i}} = \frac{0.001^4}{\frac{(9.599 \times 10^{-4})^4}{\infty} + \frac{(5.236 \times 10^{-5})^4}{\infty} + \frac{(0)^4}{4}} = \infty$$

(19) D1 : 반복측정에 의한 거리 측정 평균값

수위계를 이용한 5회 반복측정 결과에 대한 측정 결과는 아래 표와 같다.

(단위 : m)

수위계의 측정값					평균값	실험 표준편차
1회	2회	3회	4회	5회		
15.491	15.491	15.491	15.491	15.491	15.491	0

(20) D2 : 수위계의 불확도,  $u(l_2)$

- 수위계의 지시값의 안정도에 의한 불확도,  $u(l_2.w)$

수위계 지시값의 불확도는 수위계의 최소눈금의 마지막 자리수의 3배를 너비로 하는 직사각형분포로 산출할 수 있다.

$$u(l_2.w) = \frac{3 \times \text{최소눈금}}{2\sqrt{3}}$$

수위계의 최소눈금 = 1 mm

$$\text{따라서, } u(l_2.w) = \frac{3 \times 1}{2\sqrt{3}} = 0.866 \text{ mm}$$

- 수위계 사용시 분해능으로 인한 불확도,  $u(l_2.r)$

실 사용자는 수위계 자체의 분해능에 의존하여 판독할 수밖에 없으므로, 이 분해능에 의한 불확도는, 이 값을 직사각형 확률분포의 너비로 추정하여 구한다.

$$u(l_2.r) = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0.289 \text{ mm}$$

- 수위계의 우연효과에 의한 불확도,  $u(l_2.a)$

수위계를 이용한 5회 반복측정 결과는 D1의 표를 사용하며, 측정결과에서 실험표준편차는 0 mm이므로, 반복성으로부터의 우연효과에 의한

표준불확도  $u(l_2.a)$ 는

$$u(l_2.a) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0}{\sqrt{5}} = 0 \text{ mm}$$

∴ 수위계의 불확도  $u(l_2)$ 는

$$u(l_2) = \sqrt{u(l_2.w)^2 + u(l_2.r)^2 + u(l_2.a)^2} = \sqrt{0.866^2 + 0.289^2 + 0^2} = 0.913 \text{ mm}$$

(21) D3 : t분포

(22) D4 : 식 (3)을  $B$ 에 대하여 편미분하면  $\frac{\partial B}{\partial L_2} = -1.0$

(23) D5 : 표준불확도 × |감도계수| 이므로

$$D2 \times D4 = 0.913 \times 1.0 = 0.913 \text{ mm}$$

(24) D6 :

$$\nu_{L_2} = \frac{u_{L_2}^4(l_2)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(l_2)}{\nu_i}} = \frac{0.913^4}{\frac{0.866^4}{\infty} + \frac{0.289^4}{\infty} + \frac{0^4}{4}} = \infty$$

(25) E5 :  $u_c$

합성불확도는 (1)~(25)(A1~D6)까지의 요소별 불확도를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial b}{\partial l_1}\right)^2 \cdot u^2(l_1) + \left(\frac{\partial b}{\partial d}\right)^2 \cdot u^2(d) + \left(\frac{\partial b}{\partial \theta}\right)^2 \cdot u^2(\theta) + \left(\frac{\partial b}{\partial l_2}\right)^2 \cdot u^2(l_2)} = \sqrt{0.789^2 + 0.00149^2 + 0.725^2 + 0.913^2} = 1.408 \text{ mm}$$

### 3.3 최고측정능력

$u_c$ 의 유효자유도는 합성표준불확도가 교정결과의 표준편차를 얼마나 잘 추정하는가를 나타내는 것으로써 Welch-Satterthwaite 공식을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(c)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(c)}{\nu_i}} = \frac{1.408^4}{\frac{0.789^4}{\infty} + \frac{0.00149^4}{\infty} + \frac{0.725^4}{\infty} + \frac{0.913^4}{\infty}} = \infty$$

여기서, 포함인자는 유효자유도가 ∞이므로 신뢰수준 95%일 때,  $k = 2$ 를 적용하며, 합성불확도에 포함인자를 곱하여 확장불확도( $U$ ) 즉 최고측정능력을 구하면 다음과 같다.

$$U = k \times u_c = 2 \times 1.408 = 2.816 \approx 3 \text{ mm}$$

## 4. 결 론

댐 및 저수지 운영에 필수 요소인 수위 데이터에 대한 신뢰성을 높일 수 있도록 댐 운영에 가장 많이 사용되고 있는 부자식, 초음파식, 레이 다식 수위계에 대한 특성시험이 가능한 표준시험장치와 표준시험장치에 대한 운영의 일관성을 확보하기 위하여 표준시험장치를 개발하였다. 또한, 표준시험장치의 모델식을 근간으로 하여 시험에 필요한 장비들의 성능을 분석하여 표 1과 같이 수위계 표준시험장치에 대한 합성불확도는 1.408 mm, 확장불확도는 3 mm를 산출하였다.

향후 본 연구에서 개발한 표준시험장치 및 절차를 국제표준인 ISO/IEC 17025의 적합성을 인정받아 국제공인 국가교정기관의 표준교정시스템으로 확대 발전시키고자 한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 건설교통부, “수문관측매뉴얼”, 2004.
- [2] 한국수자원공사, “수자원기초자료 신뢰도 제고를 위한 수위계 및 우량계 검토방안 연구(1차년도)”, 2000.
- [3] 한국수자원공사, “수자원기초자료 신뢰도 제고를 위한 수위계 및 우량계 검토방안 연구(2차년도)”, 2001.
- [4] Robert G. Skrentner, “Instrumentation Handbook for water & wastewater treatment plants”, Lewis Pub., 1988.
- [5] 한국교정시험기관인정기구, “측정불확도 추정사례집”, 2004.
- [6] 한국표준과학연구원, “불확도 평가 및 표현 사례집”, 2005.