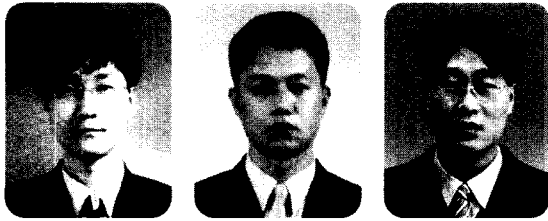


불확실도 분석을 통한 유량측정 신뢰도 개선방안



이 을 래 | 선임연구원, 한국건설기술연구원 수자원연구부
erlee@kict.re.kr

윤 광 석 | 선임연구원, 한국건설기술연구원 수자원연구부
ksyoon@kict.re.kr

차 준 호 | 연구원, 한국건설기술연구원 수자원연구부
jhcha@kict.re.kr

1. 서 론

유량측정에 의한 값은 실제 유량과는 다소의 차이를 가지게 된다. 원하는 정도의 유량측정치를 구하기 위해서는 정확도를 추정해야 하며, 적정 요구값을 얻기 위한 방법과 기기의 선정 또한 중요하다. 유량을 결정하기 위해서는 유량요소가 측정되어야 하며, 측정을 최적화하기 위해서는 각각의 유량요소가 측정되었을 때 달성될 수 있는 정확도를 알 필요가 있다. 개개의 측정요소들의 정확도는 전체 정확도에 영향을 주며, 상대적으로 낮은 정확도의 유량측정요소는 정확한 측정을 불가능하게 만든다. 이러한 유량 측정시에 발생하는 오차에 의한 불확실성을 감소시키고 유량 측정의 신뢰도를 개선하기 위해서 오차의 원인, 측정치에 내재되어 있는 오차의 처리를 위한 불확실도의 추정과 적용 방법에 대해서 조사하였다. 유량측정의 정확도 향상을 위해서는 먼저 기존 유량측정기술 조사를 통해 유량측정시에 발생하는 오차를 정량적으로 분석하고 발생원인에 대한 고찰을 통하여 측정방법을 개선하는 것이 바람직하다. 이를 위하여 먼저 전체오차의 구성에 대한 일반적인 사항을 알아본 후 유

량측정자료에서의 오차원인에 대하여 조사하였다. 또한 조사된 오차원인에 대해서 불확실도 분석을 위한 표준기법이 조사되었다.

2. 전체오차의 구성

오차는 알려지지 않은 참값과 측정값의 차이를 의미하며, 전체 측정오차는 무작위오차(random error), 계통오차(systematic error) 그리고 우연오차(mistakes, spurious error)로 구분된다. 모든 측정은 보정과 수정이 행해진 후에도 오차를 가지고 있다. 우연오차의 경

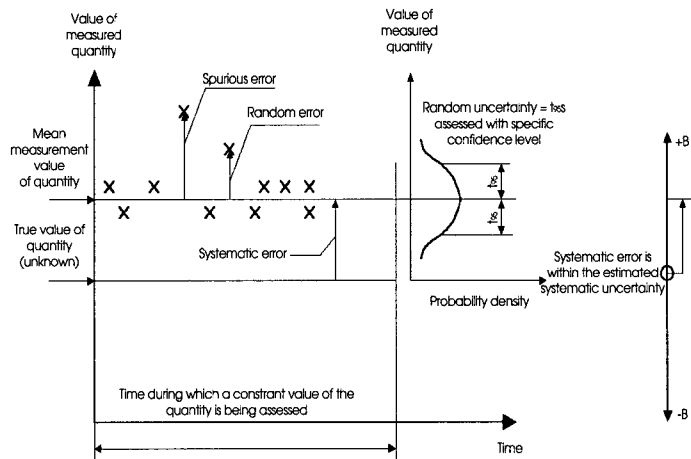


그림 1. 오차의 종류

우 측정시에 제외되는 것을 원칙으로 한다. 측정은 계통오차와 무작위오차의 두 가지 오차에 의해서 영향을 받기 때문에 정확한 측정은 이 두 가지 오차가 최소가 되도록 하는 것을 의미한다. 그림 1은 이러한 眞유량값, 평균치, 그리고 무작위오차, 계통오차, 우연오차와의 관계를 나타내고 있다.

무작위오차는 같은 입력값에 대해서 측정에 있어서 같은 값의 읽음이 수행되는 것을 막는 독립적인 영향에 의해서 야기된다. 무작위오차는 기회의 법칙(the law of chance)에 따라 평균을 따라 분포되고 자료의 수가 많아짐에 따라서 정규분포에 가까워진다. 무작위오차는 정밀오차로 간주된다.

계통오차는 부적절하게 검정된 측정기기의 사용으로 인해 발생하게 되며 각각의 흐름에 대해서 측정하는 동안 일정하다. 주어진 표본의 반복된 측정에 있어서 각각의 측정은 같은 계통오차를 수반하게 된다. 또한 기기나 장치가 교체되지 않는 한 측정값의 수를 늘려서는 감소되지 않는 오차이다. 수문관측에 있어서 계통오차는 기준척, 기준점, 유속계, 그리고 수위 기록계에 존재한다. 이 오차는 일반적으로 작지만 경우에 따라서는 그 영향이 수위-유량관계에까지 오차를 유발하게 된다. 또한 부정확한 기준점은 작은 값의 유량일 경우 웨어의 마루부분에 있어서 수위측정에서의 오차를 유발하기도 한다.

우연오차는 측정하는 동안 측정자의 실수 또는 장치의 오작동 등으로 발생하는 오차로 통계적으로 분석이 불가능한 오차이다. 그래서 관측치 중에서 이러한 오차가 발생하였을 경우에는 제외해야만 한다.

3. 불확실도의 산정

3.1 개별 불확실도의 결정

전체 불확실도를 산정하기 위해서는 불확실도를 구성하고 있는 개별 불확실도를 먼저 산정해야만 한다. 개별 불확실도는 일반적으로 하폭, 수심, 유속계를 이용한 평균유속 결정에 의한 불확실도가 있으며, 이와 더불어 부자측정법의 경우에는 수면부자유속, 부자의

유속계수, 부자측정 전후 측정된 횡단면을 사용함으로써 발생하는 불확실도가 있다.

하폭에 의한 불확실도(X_{bi})에 대해서 측선에서의 하폭의 측정은 보통 하천 좌, 우안의 거리를 측정하게 된다. 만약 거리 결정이 운반차를 사용하여 tag-line 또는 측정을 위한 줄을 이용하게 되면 거리측정에서의 불확실도는 거의 무시하게 된다.

광학(optical)이나 전자 장비가 거리측정에 사용되는 곳에서 불확실도는 측정되는 거리와 사용되는 장비에 달려 있게 된다.

수심측정에서의 불확실도(X_{di})는 사용되는 특별한 방법에 따라 측정하는 동안의 수위 변동으로 인해 사용자에 의해 결정될 수 있다. 유속계를 이용한 평균유속결정(X_{sp})에 대해서 살펴보면 발생할 수 있는 불확실도를 정확하게 예측하는 것은 불가능하지만 네 가지의 주요 원인을 들 수 있다. 이는 유속계의 제한된 측정시간(X_{st}), 측선에서 제한된 수의 측정수(X_{sp}), 유속계의 검정에 따른 불확실성(X_c) 및 제한된 수의 측정수(X_m)를 사용하는 것에서 기인하게 된다.

만약 유속측정이 부자에 의해서 수행이 되었다면 다음의 세 가지 개별 불확실도가 추가되어진다. 먼저 수면 부자유속에 대한 불확실도(X_{vi})에서는 상류단과 하류단 횡단면간의 이동경로에 대한 불확실도(X_{Li})와 상류단과 하류단 횡단면간의 부자가 이동하는데 걸리는 시간에 대한 불확실도(X_{ti})가 있다. 그리고 부자의 유속계수에 대한 불확실도(X_{Kt})에서는 만약 계수가 부자 측정과 동시에 수행되는 유속계 측정에 의해 결정되면 X_{Kt} 는 20개의 연직선의 경우 4.5%, 15개의 연직선의 경우 5.3%, 10개의 연직선의 경우 6.1%인 것으로 간주된다. 부자측정 전후 중에 측정된 횡단면을 사용함으로써 인한 불확실도(X_{dt})에서는 안정적이고, 정상상태의 수로하상에서 관측지점의 경우 이러한 불확실성은 각 횡단면에서 일반적으로 2%에서 3%의 범위에서 변하게 된다.

3.2 전체 불확실도의 결정

그림 2는 현장에서 유량측정을 수행하는 다양한 방법들을 나타내고 있다. 유량측정방법과 사용하는 유



그림 2. 다양한 유량측정방법(도섭, 보트, ADP)

구 분				
불확 실도	하폭측정(X_{bl}) 측선수(X_m)	수심측정(X_{sd}) 측점수(X_p)	유속계의 측정시간(X_t) 유속계의 불확실성(X_c)	부자유속(X_{vi}) 이동경로(X_{li}) 이동시간(X_{ti}) 유속계수(X_{ci})

그림 3. 전체 불확실도를 구성하는 인자

속계의 종류에 따라 앞에서 열거한 개별 불확실도의 값들이 조금씩 변할 수가 있다. 전체 불확실도를 산정하기 위해서는 개별 불확실도의 값들을 정확하게 산정할 필요가 있다. 특히 유량측정을 수행하는 절차가 개별 불확실도를 산정하는 중요한 인자가 되기 때문에 각 방법상에서 나타나는 절차들에 따른 방법들을 정확하게 숙지할 필요가 있다. 유량측정성가에 대한 전체 불확실도는 전술한 바와 같이 개별 불확실도에 의해 구성된다. 그림 3은 전체 불확실도를 구성하는 인자들을 나타내고 있다.

유량측정성가에 대한 전체 불확실도는 개개의 측정 요소에 대한 개별 불확실도에 의해서 구성된다. 이러한 개별 불확실도를 전체 불확실도로 계산하기 위해서는 일반적으로 평방자승근(root-sum-squares) 방정식이 사용되며 다음과 같다.

만약 Q 가 여러 측정량 x, y, z 의 함수라면 각각에 대한 오차 $\delta x, \delta y, \delta z \dots$ 대해 Q 는 식 (1)과 같다.

$$\delta Q = \frac{\partial Q}{\partial x} \delta x + \frac{\partial Q}{\partial y} \delta y + \frac{\partial Q}{\partial z} \delta z + \dots \quad (1)$$

전체 불확실도를 산정하기 위해서 Q 에 있어서의 오차 δQ 는 각각의 변량들의 제곱의 합으로 나타낼 수 있으며, (1)식을 제공하여 양변을 $Q = xyz$ 로 나누면 식 (2)와 같다.

$$X_Q = \pm (X_x^2 + X_y^2 + X_z^2)^{1/2} \quad (2)$$

여기서, X_Q 를 Q 의 표준편차백분율($\delta Q/Q$)이라고 하고, X_x 는 x , X_y 는 y , 그리고 X_z 는 z 의 백분율 표준편차이며, 각각 $(\delta x)/x$, $(\delta y)/y$, 그리고 $(\delta z)/z$ 를 나타낸다.

3.3 유속면적법에 의한 전체 불확실도

유속면적법을 사용하는 경우 불확실도에 사용되는 적용방정식의 일반화된 형태를 적용하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i d_i \bar{v}_i \quad (3)$$

여기서, Q 는 전체 유량, b_i , d_i 와 \bar{v}_i 는 횡단면이 나누어져 m 번 측선이나 구획의 i 번째 수체에서의 하폭, 수심, 그리고 평균유속이다.

3.3.1 전체 무작위 불확실도(X'_Q)

유속면적법에 대해서 X_Q 는 요소유량에 있어서의 오차백분율의 합/요소유량의 합이다.

$$X_Q = \pm \left[\sum_{i=1}^m [(b_i d_i \bar{v}_i)(X_{b_i}^2 + X_{d_i}^2 + X_{\bar{v}_i}^2)]^{1/2} \right] / \left(\sum_{i=1}^m b_i d_i \bar{v}_i \right) \quad (4)$$

위 식에서 X_b 는 하폭측정에 대한 불확실도, X_d 는 수심측정에 대한 불확실도, $X_{\bar{v}}$ 는 측선에서 평균유속에 대한 불확실도이며, 제한된 측선수를 이용함으로써 인한 무작위 불확실도(X_m)가 식 (4)에 고려되어야 한다.

추가로 평균유속($X_{\bar{v}}$)에 있어서의 불확실도는 흐름에 있어서의 진동을 최소화하는데 필요한 측정시간(X_e), 측선에서의 측정수(X_p), 그리고 유속계 검정에 따른 불확실도(X_c)와 같은 요소들을 내포하고 있다. 그러므로 $X_{\bar{v}}^2$ 은 $(X_e^2 + X_p^2 + X_c^2)$ 로 바뀌고, 유량 Q 의 95% 신뢰수준의 전체 무작위 불확실도는 식 (5)와 같은 형태가 된다.

$$X'_Q = \pm \left[X_m^2 + \sum_{i=1}^m [(b_i d_i \bar{v}_i)^2 \times (X_{b_i}^2 + X_{d_i}^2 + X_{e_i}^2 + X_{p_i}^2 + X_{c_i}^2)] \right]^{1/2} / \left(\sum_{i=1}^m b_i d_i \bar{v}_i \right) \quad (5)$$

만약 측선의 유량들이 거의 같다면 식 (5)는 식 (6)과 같이 된다.

$$X'_Q = \pm \left[X_m^2 + \frac{1}{m} (X_b^2 + X_d^2 + X_e^2 + X_p^2 + X_c^2) \right]^{1/2} \quad (6)$$

3.3.2 전체 계통 불확실도(X''_Q)

위의 방정식들은 측정의 정확도를 예측하는데 만족스럽지만 계통 불확실도의 가능성을 고려하지 않는

다. 무작위 불확실성과 같은 양상을 나타내는 계통 불확실도는 분리하여 예측할 수 있고 다음과 같이 결합된다.

$$X''_Q = \pm \sqrt{X'^2_b + X'^2_d + X'^2_c} \quad (7)$$

여기서, X'_b , X'_d , 그리고 X'_c 는 각각 하폭 b , 수심 d , 그리고 유속계 c 에서 계통 불확실도의 퍼센트 값이다. X'_c 는 유속계의 계통 불확실도인데, 이는 계기마다 무작위로 변하며 우수한 계기를 사용하거나 개선된 방법이 가능한 경우에만 제거되거나 결정될 수 있는 기기의 유형이나 측정치에 내제된 계통 불확실도는 아니다.

3.3.3 불확실도의 결합(X_Q)

95% 신뢰구간에서 유량에 대한 전체 불확실도의 추정을 위해서 모든 무작위 불확실도와 계통 불확실도는 최소자승법에 의해서 식 (8)과 같이 조합된다.

$$X_Q = \pm \sqrt{X'^2_Q + X''^2_Q} \quad (8)$$

결과의 최종 제시는 다음 방법들 중 하나를 이용하게 된다(ISO/TR 5168, 1998).

- ▷ 유량 = $Q \pm X_Q$; 무작위 불확실도 = $\pm X'_Q$
- ▷ 유량 = Q ; 무작위 불확실도 = $\pm X'_Q$; 계통 불확실도 = $\pm X''_Q$

3.4 부자 유속측정에 의한 전체 불확실도

부자 유속측정에 의한 불확실도 산정을 위하여 다음의 유량산정 방정식을 고려할 수 있다.

$$Q = K_f \sum_{i=1}^m \frac{A'_i + A_i}{2} = K_f \sum_{i=1}^m \frac{\left(\frac{L}{T}\right) [b_i(d_{i-1} + d_i) + b'_i(d'^4_{i-1} + d'^4_i)]}{4} \quad (9)$$

여기서, Q 는 전체 유량, m 은 구획의 수, \bar{v}_i 는 i 번째

구획의 평균 부자유속, A_i 와 A'_i 는 각각 상류단과 하류단 횡단면의 i 번째 구획의 단면적, b_i 와 b'_i 는 각각 상류단과 하류단 횡단면의 i 번째 구획의 하폭, d_i 와 d'_i 는 각각 상류단과 하류단 횡단면의 i 번째 연직선의 수심, L 은 상류단과 하류단 횡단면간의 거리, T 는 상류단과 하류단 횡단면간의 거리를 부자가 이동하는데 걸리는 평균시간, K_f 는 부자에 대한 유속계수이다.

3.4.1 전체 무작위 불확실도(X'_Q)

무작위 불확실도 산정을 위한 단순화된 방정식은 다음과 같다.

$$X'_Q = \pm \sqrt{X_m'^2 + X_{Kf}'^2 + \left(\frac{1}{m}\right) \frac{(X_b'^2 + X_d'^2) + X_L'^2 + X_T'^2}{2}} \quad (10)$$

여기서, m 은 구획의 수이며 '은 각각에 의한 백분율 무작위 불확실도를 나타내는 것으로서 X'_m 은 제한된 측선수, X'_{Kf} 는 부자에 의한 유속계수, X'_b 는 하폭측정, X'_d 는 수심측정, X'_L 은 거리측정, X'_T 는 부자의 유하시간에 의한 값들을 나타내고 있다. 만약 횡단면이 홍수기 동안 측정될 수 없다면, 상하류단면의 불확실도 X'_{af} 가 고려되어야 한다.

그러므로 이 방정식은 다음과 같게 된다.

$$X'_Q = \pm \sqrt{X_m'^2 + X_{Kf}'^2 + \left(\frac{1}{m}\right) \frac{(X_b'^2 + X_d'^2) + X_L'^2 + X_T'^2 + X_{af}'^2}{2}} \quad (11)$$

3.4.2 전체 계통 불확실도(X''_Q)

$$X''_Q = \pm \sqrt{\frac{(X''_b + X''_d)}{2}} \quad (12)$$

여기서, X''_b , X''_d 는 하폭 및 수심에 대한 계통 불확실도의 퍼센트 값이다.

3.4.3 조합된 불확실도(X_Q)

$$X_Q = \pm \sqrt{X'^2_Q + X''^2_Q} \quad (13)$$

4. 유량측정성과의 불확실도 분석

ISO에 제시된 단위요소별 불확실도는 표 1~5와 같이 제안을 하고 있다. 여기서 제시한 값들은 유량측정방법에 따른 일반적인 불확실도를 나타내고 있다. 이 수치는 일반적인 모든 하천에 적용하는 것은 아니며, ISO에서는 불확실도를 산정할 때 가능하면 해당 하천 고유의 단위 요소별 불확실도를 만들어서 사용할 것을 권장하고 있다.

표 1. 측선수(X'_m)

측선수	불확실도(%)
5	15
10	9
15	6
20	5
25	4
30	3
35	2
40	2
45	2

표 2. 측정시간(X'_e)

유속 (m/s)	측정시간별 불확실도(%)							
	측정 : 0.2D, 0.4D or 0.6D				측정 : 0.8D or 0.9D			
	0.5분	1분	2분	3분	0.5분	1분	2분	3분
0.05	50	40	30	20	80	60	50	40
0.10	27	22	16	13	33	27	20	17
0.20	15	12	9	7	17	14	10	8
0.30	10	7	6	5	10	7	6	5
0.40	8	6	6	5	8	6	6	5
0.50	8	6	6	4	8	6	6	4
1.00	7	6	6	4	7	6	6	4
1.00 이상	7	6	5	4	7	6	5	4

표 3. 측정수(X'_p)

측정 방법	불확실도(%)
유속분포	1
5점	5
2점	7
1점	15

표 4. 유속계 검정(X'_c)

유속 (m/s)	불확실도(%)	
	개 별 검 정	그 룹 또는 표 준 검 정
0.03	20	20
0.10	5	10
0.15	2.5	5
0.25	2	4
0.50	1	3
0.50 이상	1	2

표 5. 하폭측정(X'_b), 수심측정(X'_d) 및 계통 불확실도 (X''_b (하폭), X''_d (수심), X''_c (유속검정))

항목	X'_b	X'_d	X''_b	X''_d	X''_c
불확실도(%)	0.1~0.5	1~3	0.5	0.5	1.0

표 6은 유속면적법을 이용하여 단일유량을 결정할 때, 관측된 측정결과에 대한 불확실도를 산정하는 계산 예를 나타내고 있다. 부자측정법에서도 다음의 절차에 따라서 계산하게 되며 계산과정은 동일하다.

표 7은 미국지질조사국(USGS, 2000)에서 제시하는 유속계측정에 대한 등급기준과 ISO 기준에 나타나 있는 부자측정 불확실도 10~20%의 기준을 참고로 하여 임의기준을 세워 등급을 분류하였다. 그림 4는 국내의 과거자료와 2002년의 유량측정성과(건설교통부, 2002)의 전체 불확실도를 비교한 그림으로, 각 지점별로 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히 한강유역은 과거자료도 어느 정도 측정성과가 좋았으

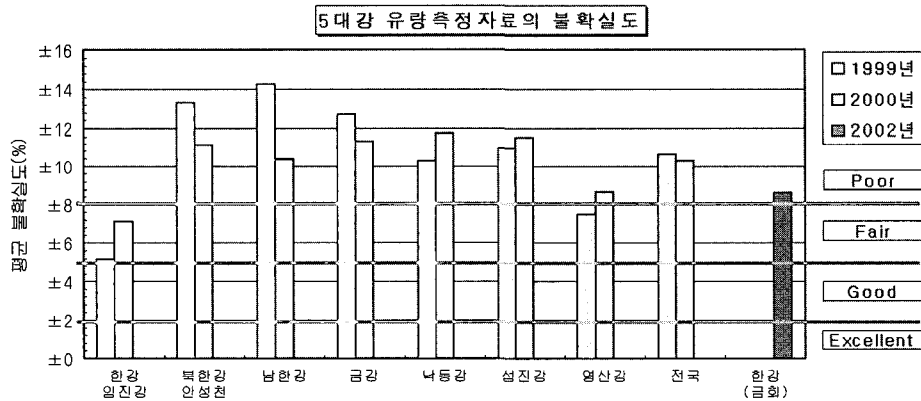


그림 4. 과거 및 최근 유량측정성과 전체 불확실도 비교

표 6. 유량측정에 의한 불확실도 분석 예

유량	24.012m ³ /s	측선수	20
평균유속	0.304m/s	측정법	5점법
측정시간	3분	유속계 검정방법	개별검정
X'_m	5.0%(표 1)	X'_b	0.1%(표 5)
X'_d	1.0%(표 5)	X'_e	5.0%(표 2)
X'_p	5.0%(표 3)	X'_c	1.0%(표 4)
X''_b	0.5%(표 5)	X''_d	0.5%(표 5)
X''_c	1.0%(표 5)		
X'_o	±5.2%(식 6)	• 유량 = 24.012m ³ /s ±5.3%, 무작위 불확실도 = ±5.2% • 유량 = 24.012m ³ /s 무작위 불확실도 = ±5.2% 계통 불확실도 = ±1.0%	
X''_o	±1.0%(식 7)		
X_o	±5.3%(식 8)		

표 7. 유량측정성과 등급기준

등급	유속계 측정(USGS)	부자 측정(임의 기준)
1등급 (Excellent)	불확실도 ≤ 2%	불확실도 ≤ 10%
2등급 (Good)	2% < 불확실도 ≤ 5%	10% < 불확실도 ≤ 15%
3등급 (Fair)	5% < 불확실도 ≤ 8%	15% < 불확실도 ≤ 20%
4등급 (Poor)	8% < 불확실도	20% < 불확실도

며, 금회 측정값은 한강을 제외한 다른 수계에 비해서 유량측정성과의 불확실도가 낮음을 알 수가 있었다.

5. 결론

유량을 결정하기 위해서는 각각의 유량요소가 측정되었을 때 각 요소들이 달성되어야 하는 정확도를 확인할 필요가 있다. 일반적으로 수문관측자료는 무작위 속성 때문에 통계적인 입장에서 정확도가 해석되어지고 설명되어야 할 필요가 있다. 관측자의 노력과

정밀한 관측기기를 사용하여 측정된 수문관측자료도 어느 정도의 불확실성을 항상 내포하게 되며, 이러한 불확실성을 어떻게 정량화할 수 있는가 하는 문제는 관측데이터를 평가하는데 상당히 중요한 요소가 될 수 있다. 정확한 참값의 부재에 따른 오차의 추정결과를 불확실성을 계산함으로써 유량측정의 성과 및 등급을 판단하게 된다. 향후 유량측정의 신뢰도를 향상시키기 위해서 본 연구에서 제시한 불확실도 분석을 이용한다면 좀더 양질의 수문자료를 제시할 수 있게 될 것으로 판단된다.

참/고/문/헌

건설교통부(2001), 수문관측효율성 제고방안 연구보고서
 건설교통부(2002), 2001년도 한강유역 수자원 시험장비의 설치 및 운영(시험유역 및 주요 지천 등에 대한 유량측정)
 ISO 748(1979), Liquid Flow Measurement in Open Channels - Velocity Area Methods: International

Organization for Standardization
 ISO/TR 5168(1998), Measurement of Fluid Flow -Evaluation of Uncertainties
 USGS(2000), Measurement of Stream Discharge by Wading, Water Resources investigation Report 00-4036