

유량측정자료의 불확실도 분석

Uncertainty Analysis in Flow Measurement Data

○차 준 호·김 원·윤 광 석·김 동 구

1. 서론

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.

유량측정자료의 정확도는 목적에 따라 중요한 의미를 가진다. 정확도의 정도는 관측자의 관점, 설계, 건설, 경제, 경영 등의 전반적인 사항을 고려하여야한다. 이때 중요한 고려사항은 알맞게 노력을 증가시킴으로써 어느 정도까지 정확도를 향상시킬 수 있는 지이다. 이러한 정확도의 향상을 위해서는 먼저 유량측정 시에 발생하는 오차원인에 대한 검토와 과거에 측정자료의 오차를 정량적으로 분석하고 발생원인에 대한 고찰을 통하여 측정방법을 개선하는 것이 바람직하다. 이를 위하여 먼저 일반적인 유량오차와 불확실도 분석기법이 조사되었으며 1999년과 2000년의 5대강 유량측정자료에 적용되었다.

2. 불확실도 분석기법

오차는 항상 알려지지 않은 참값과 측정값의 차이를 의미한다. 전체측정오차는 계통오차, 무작위오차 그리고 우연오차로 구분되며 그림 1에 나타나 있다. 측정시의 모든 측정은 모든 보정과 수정이 행해진 후에도 오차를 가지고 있다. 이러한 오차는 양 또는 음의 크기를 갖으며 시간에 따라 변한다. 우연오차의 경우 측정 시에 제외되는 것을 원칙으로 한다.

불확실도는 대개의 경우에 있어서 초과하지 않아야 하는 오차의 추정이다. 오차의 상한계를 갖도록 하는 것은 불가능하기 때문에 요구되는 적당한 확률로 측정치의 참값이 어느 구간에 위치하도록 하는 것이 더욱 실용적이다. 여기서 불확실도 구간이라는 것은 $[\bar{x} - U, \bar{x} + U]$ 이며 구간은 불확실도의 두 배이다. 측정은 계통오차와 무작위 오차의 두 가지 오차에 의해서 영향을 받기 때문에 정확한 측정은 이 두 가지 오차가 최소가 되도록 하는 것이다(ISO 5168; 748).

2.1 전체오차의 구성

2.1.1 무작위오차

무작위오차는 같은 입력값에 대해서 측정에 있어서 같은 읽기가 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. 때때로 무작위 오차는 정밀오차로 간주되어지며 표준편차 (σ)는 무작위오차 (ϵ)의 측정에 이용되어진다. 큰 표준편차는 측정치들이 산포되어 있는 것을 의미한다.

· 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원
.. 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원

1.1.2 계통오차

전체오차의 두 번째 구성요소는 계통오차(β)이다. 각각의 흐름에 대해서 측정하는 동안 일정하다. 주어진 표본의 반복된 측정에 있어서 각각의 측정은 같은 계통오차를 수반한다. 계통오차는 진값과의 비교에 의해서만 결정될 수 있기 때문에 측정이 거의 불가능하다. 계통오차는 측정치가 편의(biases)되어 있음을 의미한다. 계통오차의 진값은 알려져 있지 않기 때문에 불확실도 분석에서는 상한치(B)가 사용되어진다. 대부분의 경우에 있어서 계통오차(β)는 측정치에 대해서 (+) 혹은 (-)로 나타나는데 이는 계통불확실도는 $\pm B$ 로 나타내며 이는 계통오차(β)의 상한치로써 추정되어진다.

1.1.3 우연오차

우연오차는 측정자의 실수 또는 장치의 오작동 등에 의해서 발생하는 오차로써 이러한 오차가 발생된 측정치는 제외되어야 한다. 예를 들면, 자료 기록 시에 측정자의 실수에 의해 순서가 바뀌거나 또는 액주계의 기포존재 등을 들 수 있다. 이러한 오차는 통계적인 처리가 불가능하기 때문에 측정치는 제외되어야 한다. 측정과정을 정확하게 하여 이러한 우연오차가 발생하지 않도록 많은 노력을 기울여야 한다.

2.2 유속-면적법에서의 오차형태

일반적으로 오차는 계통적인 특성과 무작위적인 특성에 따라 구별된다. 원인에 따라 오차는 사용된 기기에 따른 것, 측정과정 그리고 자료처리과정에 따른 것으로 구분될 수 있다. 유속-면적법의 경우 폭, 수심 그리고 유속의 세 가지 양의 측정이 필요하며 이러한 유속-면적법의 이용시의 일반적인 오차발생에 대해서 조사되었으며 기기의 계통오차는 제외되었다. 측정에 있어서 단면에서의 평균유속을 구하는데 이용되는 방법과 대상단면에서의 수심을 결정하는 방법에 따라서 오차의 크기가 달라진다. 기기오차를 제외하고 평균유속을 결정하는데 있어서 다음의 3가지 형태의 오차를 고려할 수 있다(ISO 7178; 1088).

- 측선에서의 점유속의 제한된 측정시간에 기인하는 오차형태 I(측정시간)
- 측선에서의 취해지는 제한된 측정수에 의해 발생하는 오차형태 II(측선에서의 측정수)
- 횡단면에서 제한된 측정수에 기인하는 오차형태 III(측선수)

2.3 개별불확실도의 결합

유량측정에 대한 불확실도는 유량측정횟수에 의해서 추정되고 표준편차에 의해서 계산된다. 관측자료에 대해 통계적인 방법을 적용함에 있어 통계적으로 일정한 분포에 있는 관측치가 독립적인 임의의 변수라는 가정이 필요하며 기본적으로 측정과정은 정밀하게 이루어지고 가능한 수정과 보정이 이루어진 자료를 기초로 해야한다. 오차의 상한경계를 얻는 것은 거의 불가능하기 때문에 적절하게 높은 확률로 측정되어진 측정치에 대해서 참값의 범위를 얻는 것이 더욱 이상적이며 전체오차는 개개의 측정요소에 있어서의 불확실도에 의해서 구성된다. 이러한 개개의 불확실도를 전체 불확실도로 계산하기 위해서 일반적으로 적용되는 평방자승근(root-sum-squares) 방정식이 사용되며 다음과 같다(Hershey, 1985; 1999).

만약 Q 가 여러 측정량 x, y, z 의 함수라면 각각에 대한 오차 $\delta x, \delta y, \delta z \dots$ 대해 Q 는 다음과 같다.

$$\delta Q = \frac{\partial Q}{\partial x} \delta x + \frac{\partial Q}{\partial y} \delta y + \frac{\partial Q}{\partial z} \delta z + \dots \quad (6)$$

식 (11)에서 우변 첫째 항은 Q 에 있어서 단지 x 에 의해 기인되는 오차 δx 를 의미한다. 나머지 항도 이와 같으며 식 (12)의 양변을 제곱하면 아래와 식과 같다

$$\delta Q^2 = \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \delta x\right)^2 + 2 \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\partial Q}{\partial y} \delta x \delta y + \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \delta y\right)^2 + \dots \quad (7)$$

식 (7)에서 우변에서 둘째항은 결합항이고, 그들은 양 또는 음의 값을 갖기 때문에 산술합은 0을 갖거나 또는 제곱항에 비해서 상대적으로 적은 값을 갖기 때문에 무시할 수 있다. 따라서 식 (7)은 식 (8)과 같이 바꿀 수 있다.

$$\delta Q^2 = \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial y} \delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial z} \delta z\right)^2 \quad (8)$$

Q 에 있어서의 오차 δQ 는 각각의 변량들의 제곱의 합으로 나타낼 수 있으며 여기서,

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = yz \quad \frac{\partial Q}{\partial y} = xz \quad \frac{\partial Q}{\partial z} = xy \quad (9)$$

$$\delta Q = [(yz \delta x)^2 + (xz \delta y)^2 + (xy \delta z)^2]^{1/2} \quad (10)$$

가 되고 양변을 $Q=xyz$ 로 나누면 식 (10)과 같다.

$$\frac{\delta Q}{Q} = \left[\left(\frac{\delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\delta y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\delta z}{z}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

윗 식에서 $(\delta x)/x$, $(\delta y)/y$ 그리고 $(\delta z)/z$ 는 표준편차의 분수값이고 각각에 100이 곱해진다면 백분율 표준편차가 된다. X_Q 를 Q 의 표준편차백분율이라고 하고 X_x 는 x , X_y 는 y , 그리고 X_z 는 z 의 백분율 표준편차라 하면 식 (11)과 같으며 이는

$$X_Q = \pm (X_x^2 + X_y^2 + X_z^2)^{1/2} \quad (11)$$

유속면적법에 대해서

X_Q = 요소유량에 있어서의 오차백분율의 합 / 요소유량의 합

$$X_Q = \pm \left[\sum_{i=1}^m [(b_i d_i \bar{v}_i) (X_b^2 + X_d^2 + X_{\bar{v}}^2)^{1/2}] / \left(\sum_{i=1}^m b_i d_i \bar{v}_i \right) \right] \quad (12)$$

윗 식에서 X_b 는 폭측정에 대한 불확실도, X_d 는 수심측정에 대한 불확실도, $X_{\bar{v}}$ 는 측선에서 평균 유속에 대한 불확실도, 그리고 X_m 는 측수의 제한에 의해서 발생하는 불확실도이며 평균유속 ($X_{\bar{v}}$)에 있어서의 불확실도는 흐름에 있어서의 진동을 최소화하는데 필요한 노출시간 (X_e), 측선에서의 측점수 (X_p), 그리고 유속계 회귀곡선의 불확실도 (X_c)에 따른다. 그러므로 $X_{\bar{v}}^2$ 은 $(X_e^2 + X_p^2 + X_c^2)$ 로 바뀌고 방정식은 아래와 같은 형태가 된다.

$$X_Q = \left[X_m^2 + \sum_{i=1}^m [(b_i d_i \bar{v}_i)^2 (X_b^2 + X_d^2 + X_e^2 + X_p^2 + X_c^2)] / \left(\sum_{i=1}^m b_i d_i \bar{v}_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

만약 측선의 유량들이 거의 같다면 식 (13)는 식 (14)와 같이 된다.

$$X'_Q = \pm \left[X'_m + \frac{1}{m} (X_b'^2 + X_d'^2 + X_e'^2 + X_p'^2 + X_c'^2) \right]^{1/2} \quad (14)$$

3. 5대강 유량측정자료의 불확실도 분석

하천에서 측정되는 유량의 정확성을 높이기 위해서는 과거에 측량된 자료에 대한 불확실도를 정량적으로 분석하고 발생원인에 대한 고찰을 통해서 측정방법을 개선하는 것이 바람직하다. 이를 위해서 기존의 5대강 유량측정자료를 수집하고 오차평가기법을 이용하여 유량측정자료의 불확실도가 계산되었다. 불확실도를 평가기법을 이용하여 한강본류를 비롯한 5대강 유역에서의 1999년과 2000년도 유량측정 보고서의 유량성과자료에 대한 신뢰도 95%에 대한 불확실도를 평가하였다. 개개불확실도는 국제표준규격(ISO)(1979, 1998)을 따라 선정되었는데 이 값들은 권장값이며 실제 적용상 가감이 필요하나 국내의 실제 유량측정자료에 대한 개개불확실도에 대한 자료가 존재하지 않기 때문에 개개불확실도는 권장값이 사용되었다. 무작위 불확실도와 계통불확실도는 최소자승법에 의해 전체 불확실도로 계산된다. 유량측정은 홍수시에는 부자를 이용한 유량측정을 실시하였고 평·저수시에는 유속계를 사용하였다. 유량측정자료에 대한 불확실도의 계산에서는 유속계를 이용한 평·저수시의 자료만이 이용되었다. 표 1에 5대강유역의 유량측정성과에 대한 불확실도가 나타나 있다. 평균 불확실도는 유역에서의 측정지점들의 평균을 의미하며 최대, 최소는 측정지점의 전체 불확실도 중에서 최대와 최소를 나타낸다. 표 1에서의 낙동강 1999년, 섬진강 1999년, 영산강 2000년은 자료를 수집하지 못하여 차후에 추가될 것이다. 그림 2~7에 북한강유역에 대해서 유량, 유속, 측선과 불확실도와의 관계 그리고 수면폭에 대한 측선수를 측정지점과 하천설계기준의 기준 측선수와 비교를 도시하였다. 계통불확실도의 경우 불확실도의 요소가 모두 동일하기 때문에 같은 값을 가지게 되지만 유속과 측선수에 따라서 불확실도의 크기가 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 그림 2~5에서 보듯이 유량과 유속의 크기가 커질수록 측선수가 많아질수록 불확실도는 감소하는 것으로 나타나 있다. 유량이 많아질수록 유속의 크기가 증가하게되며 적은 유량과 유속에 비해서 상대적으로 개개불확실도가 작게 나타나고 있다.

4. 결론

하천에서 측정되는 유량의 정확성을 높이기 위해서 먼저 전체오차의 구성과 유속-면적법의 오차에 대해서 살펴보고 유량측정자료의 정확도를 평가하기 위한 불확실도 평가기법을 이용하여 과거 자료에 대해서 불확실도 평가가 수행되었으며 이러한 과거자료에 대한 적용과 고찰을 통해서 측정방법을 개선하는 것이 바람직할 것이다. 그림 1~5에서 보듯이 표 1의 유량측정자료의 불확실도에서 보듯이 따라서 임의의 유량측정 지점에서 유속이 낮음으로 인해 불확실도가 크게 나타날 경우에는 그 지점의 횡단면에서의 측선수를 증가시키거나 유속계를 이용하여 유속을 잴 때 측정시간을 늘림으로써 불확실도를 감소시킬 수 있다.

5. 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-1-1)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 금강홍수통제소, 1999. 5. 금강수계 유량측정조사 보고서
 금강홍수통제소, 1999. 12. 금강수계 유량측정조사 보고서.
 낙동강홍수통제소, 2001. 5. 낙동강수계 유량측정조사 보고서.
 섬진강홍수통제소, 1999. 12. 유량측정조사 보고서.
 한강홍수통제소, 1999. 11. 한강(하류)유역 유량측정 보고서.
 한강홍수통제소, 1999. 11. 남한강 유역 유량측정 보고서.
 한강홍수통제소, 1999. 11. 북한강·안성천 유역 유량측정 보고서.
 한강홍수통제소, 2000. 12. 한강(하류) 및 임진강 유역 유량측정 보고서.
 한강홍수통제소, 2000. 12. 남한강 유역 유량측정 보고서.
 한강홍수통제소, 2000. 12. 북한강·안성천 유역 유량측정 보고서.
 한국수자원학회, 2000. 하천설계기준
 Hershy, R. W., 1985. Accuracy-streamflow measurement : Elsevier Applied Science Publishing.
 Herschy, R. W., 1999. Hydrometry, John Wiley & Sons.
 ISO 748, 1979. Liquid flow measurement in open channels
 ISO/TR 7178, 1983. Liquid flow measurement in open channels - Velocity-area method - Investigation of total error
 ISO 1088, 1985. Liquid flow measurement in open channels - Velocity-area method - Collection and processing of data for determination of error in measurement
 ISO/TR 5168, 1998. Measurement of fluid flow - Evaluation of uncertainties.

표 1 5대강 유량측정자료의 불확실도

유역	1999년		2000년		비고
	불확실도 (%)	측정지점	불확실도 (%)	측정지점	
한강, 임진강	평균=±5.12%	팔당대교, 자양, 장수교, 한강대교, 행주대교	평균=±7.09%	한강대교, 잠수교, 팔당대교, 영동대교, 적성, 군남, 중랑교	
	최대=±5.90%		최대=±9.10%		
	최소=±4.13%		최소=±4.71%		
북한강, 안성천	평균=±13.31%	청평, 강촌, 서면, 평택, 공도, 증안교	평균=±11.12%	청평, 강촌, 서면, 흑천교, 평택, 공도, 동연교, 안양, 성남	
	최대=±15.62%		최대=±16.25%		
	최소=±11.47%		최소=±5.90%		
남한강	평균=±9.26%	목계, 문막, 복하, 청평, 여주, 청미	평균=±10.36%	목계, 문막, 복하, 양평, 여주, 청미, 퇴계원, 경안	
	최대=±15.62%		최대=±12.50%		
	최소=±4.13%		최소=±9.55%		
금강	평균=±12.71%	강경, 규암, 공주, 우성, 금남, 석화, 북일, 회덕	평균=±11.34%	공주, 우군, 규암, 강경, 금남, 논산, 구룡, 회덕, 유성, 석동, 석화, 청주, 우성, 북일	
	최대=±16.68%		최대=±16.86%		
	최소=±13.45%		최소=±8.18%		
낙동강			평균=±10.67%	낙동, 왜관, 고령교, 현동, 적포교, 진동, 삼랑진	
			최대=±16.86%		
			최소=±5.90%		
섬진강			평균=±11.52%	남원, 적성, 구제, 송정, 하동	
			최대=±15.03%		
			최소=±7.20%		
영신강	평균=±7.49%	마북, 신암, 남평, 나주, 운산			
	최대=±9.49%				
	최소=±6.68%				

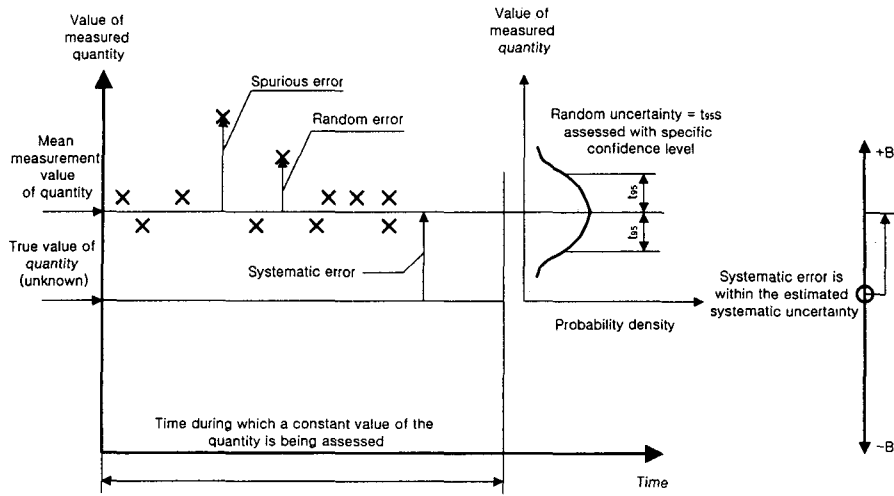


그림 1 전체오차의 구성

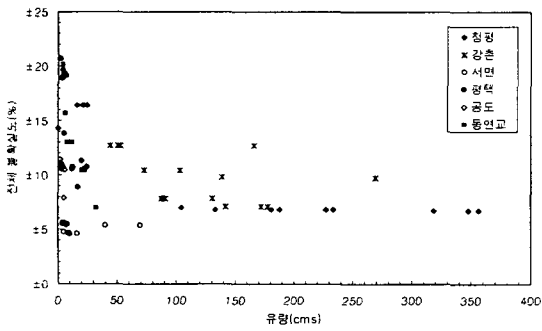


그림 2 유량에 따른 불확실도(복한강)

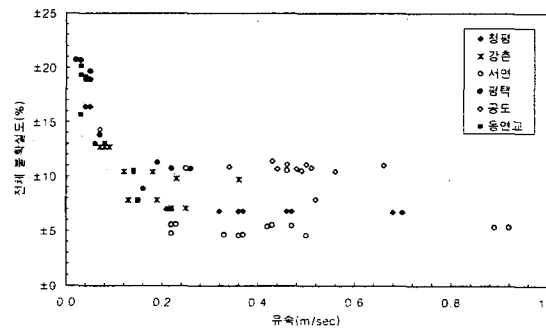


그림 3 유속에 따른 불확실도(복한강)

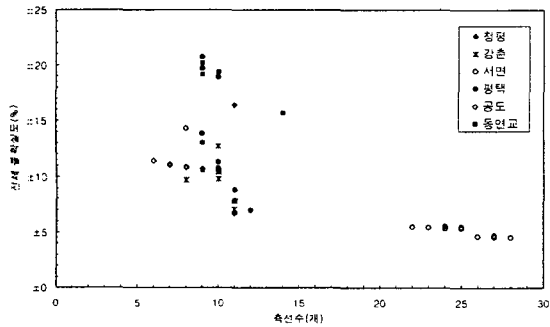


그림 4 측선수에 따른 불확실도(복한강)

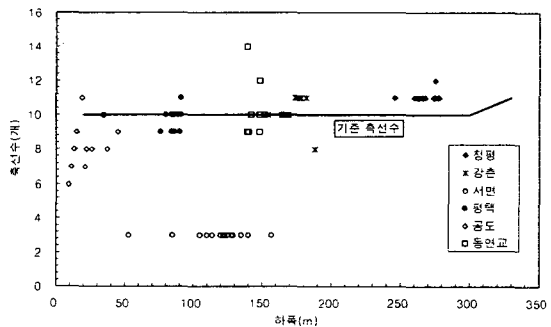


그림 5 기준 측선수에 따른 불확실도(복한강)