

# 하천 유량측정에서 제한된 측선수에 따른 불확실도

## Uncertainties due to The Limited Number of Verticals in River Discharge Measurement

김치영\* · 차준호\*\* · 김동구\* · 김원\*\*\*

Kim, Chi Young · Cha, Jun Ho · Kim, Dong Gu · Kim, Won

### 요 지

일반적으로 하천유량은 하천단면에서 하폭, 수심, 유속 등에 대한 연속적인 측정으로 계산된다. 이론적인 적분법 대신 구간 유량의 합으로 유량을 산정하는 방법들은 한 측선에서 유속과 수심이 균일하다는 가정과 측선사이에서 유속 및 수심이 선형적인 관계를 지니고 있다는 가정을 포함한다. 따라서 너무 작은 측선수의 선택은 상당한 오차를 유발하게 된다.

유속-면적법에 의한 하천유량 측정에 있어 한정된 측선수를 선택하는데 따른 측정유량의 불확실도를 분석하였다. 측선수에 따른 불확실도를 분석하기 위해 국내의 중소하천 유량측정 지점을 중심으로 9개 하천에서 19개의 측정자료를 활용하였다. 유속 및 수심측정은 50개 이상의 측선에서 측정하였으며, 한 측정에서 유속측정은 수직측 컵형태의 유속계를 활용하여 120초 이상 측정하였다.

50개 이상의 측선으로 계산한 유량을 진유량으로 가정하고 각각 측선수에 따른 불확실도를 분석한 결과 작은 측선수를 선택할 경우 정확도가 심각하게 낮아질 가능성이 있는 것으로 나타났다. 또한 20측선 이상에서 5%이하로 수렴되어가는 경향을 나타냈다. 따라서 하천 유량측정 실무에서 20측선 이상의 측선을 선택하는 것이 비교적 정확하면서 경제적인 유량측정이 될 것으로 판단된다.

**핵심용어:** 유속-면적법, 유량측정 정확도, 측선수, 불확실도

### 1. 서론

일반적으로 하천유량은 연속으로 측정된 수위자료를 수위-유량관계 곡선에 대입하여 연속유량으로 환산한다. 그렇기 때문에 하천유량자료는 수위-유량관계 곡선의 정확도에 의존하게 되며, 수위-유량관계 곡선의 정확도는 개별 유량측정의 정확도에 크게 좌우된다. 하천 유량은 시간 및 공간적으로 변하고 있기 때문에 어떤 시점에 한 횡단을 흐르는 유량의 참값을 알 수는 없다. 따라서 하천유량을 측정하는데 있어 절대적인 비교는 불가능하다. 이러한 이유로 인해 하천 유량측정의 정확도 수준을 평가하는데 있어 주로 사용하는 방법이 불확실도 분석에 의한 정확도 평가이다.(ISO738, 1997)

일반적으로 유량측정은 정해진 측선에서 측정된 수심 및 유속을 측정하며, 이들 자료를 이용하여 중간 단면법 혹은 평균단면법에 의해 계산되어진다. 이와 같은 유량계산 방법은 균일성과 선형성의 가정에 의한 것이다. 때문에 개별 유량 측정의 정확도는 유속, 수심, 거리 등 개개 측정 요소의 정확도에 의존한다. 이러한 개별 정확도 요소의 정확도의 조합에 의해 개별 유량측정의 전체 정확도가 평가될 수 있다. 원하는 정확도 수준의 유량 측정치를 얻기 위해서는 개별 불확실도 요소가 추정되어야 하며, 적정 요구 값을 얻기 위한 측정 방법과 기기를 선정하여야 한다.

지금까지 국내 유량측정 실무에서 유량측정 자료의 오차에 대해 체계적이고 구체적인 원인 및 범위에 대

\*정회원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원 · Email : cy\_kim@kict.re.kr

\*\*정회원 · 동부엔지니어링(주) 수자원부

\*\*\*정회원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 수석연구원

한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구는 하천 유량측정에 영향을 미치는 요소를 규명하고 유량측정의 정확도에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 측선수에 따른 불확도를 국내 하천에서 실증적으로 분석하고자 한다.

## 2. 하천유량측정시 정확도 영향 인자

이론적으로 하천유량은 횡단면의 유속장에 대한 적분을 통하여 구할 수 있다.

$$Q = \iint_A V(x,y) dx dy \quad (1)$$

여기에서 Q는 미지의 진유량이다. A는 횡단면적이고, v(x,y)는 폭x와 깊이 y에 대한 유속장이다. 일반적으로 하천유량은 하천단면에서 하폭, 수심, 유속의 측정에 의해 구간별 유량을 계산하고 이들의 합에 의해 구해진다. 세계적으로 널리 사용되고 있는 구간별 유량을 구하는 방법은 중간단면법 혹은 평균단면법이다. 구간별 유량은 식(2)에 의해 계산된다.

$$Q = \sum_{i=1}^N (b_i \times d_i \times v_i) \quad (2)$$

여기에서 Q는 전체 계산유량, N은 구간 불할 수, b<sub>i</sub>는 i소단면의 구간 폭이며, d<sub>i</sub>, v<sub>i</sub>수심과 유속이다. 중간단면법 혹은 평균단면법에 의한 유량계산법은 연속적으로 분포하는 수심과 유속을 균일성과 선형성의 가정에 소단면으로 나누어 유량을 계산하는 방법이다. 따라서 이와 같은 방법에 의해 계산된 유량은 아래와 같은 오차 원인을 지니고 있다.(Carter and Anderson 1963; Hershy 1975a)

- (1) 횡단면적 정의에 있어서 오차 즉, 폭과 수심 측정에서 발생하는 오차이다.
- (2) 평균유속 측정과 관련된 오차로서 유속계의 오차, 유속의 연직, 수평 방향의 분포, 유속진동, 비직각 흐름, 난류 등으로 인해 발생하는 오차
- (3) 식(1)의 적분식을 식(2)의 구분 유량으로 합으로 근사하는데 있어 발생하는 오차
- (4) 측정 중 수위변화, 경계효과, 얼음, 장애물, 바람, 부적절한 장비, 부적절한 측정방법, 측선의 부적절한 분포, 부주의 등으로 인해 발생하는 오차

## 3. 관련문헌 검토

선진외국의 경우 유량측정의 정확도 수준을 정의하기 위하여 오래 전부터 연구를 수행해 왔다. 그러나 대부분의 연구는 정성적인 수준의 연구에 머물고 있거나 그들의 결론에 도달하기 위해 1개 혹은 2개 하천에서 매우 제한된 수의 자료를 이용하여 분석하였다.(Pellitier, 1988)

유량측정의 정확도에 관련하여 체계적인 조사 연구는 Herschy(1975), Carter & Anderson(1963)에 의해 이루어졌다. Herschy의 연구는 주로 영국의 하천에서 이루어졌으며, 연구 결과는 ISO에 제시된 불확실도 값을 유도하는데 많은 부분이 사용되었다. Carter & Anderson의 연구는 유량측정 정확도와 관련하여 매우 중요한 부분을 차지하고 있지만, Herschy의 연구와 달리 유속규모에 따른 오차가 포함되어 있지 않고, 유속진동에 따른 오차를 유속범위별로 구분하여 제시하고 있지 못하다는 한계를 지니고 있다.

Herschy(1978a)는 미국의 46개 하천에서 196개의 유량측정 결과를 분석하였다. 51개에서 310개 사이의 측선수에서 유속 및 수심이 측정된 자료를 활용하였다. ISO는 여러 국가에서 평균 50개(31~66개 사이)의 측선에서 측정된 자료를 이용하여 불확실도를 분석하였다. 표 1은 ISO와 Herschy의 연구결과를 나타낸 것이다.

표 1 불확실도값 비교

No. of Verticals	ISO	Herschy
5	15	20
10	9	10
15	6	7
20	5	5
25	4	5
30	3	3
35	2	3
40	2	3
45	2	3

## 3. 측정자료 수집 및 분석

### 3.1 측정자료 수집

\* 출처 : ISO(1979)  
Herschy(1978)

오차는 우연오차, 계통오차, 무작위 오차로 분류될 수 있으며, 우연오차를 측정자의 실수, 측정기기의 잘못된 작동 등으로 정의된다. 계통오차는 부적절하게 검정된 측정기기 사용 등에 의해 발생하는 오차로 측정치가 편의(biases)되어 있음을 의미한다. 따라서 계통오차는 개별 유량측정시 지속적으로 발생할 가능성이 있지만 진값과 비교를 통해서만 결정될 수 있기 때문에 측정이 불가능하다. 무작위오차는 기회의 법칙에 따라 평균에 따라 분포하는 오차이며, 무작위 오차의 결정에 표준편차가 사용되기도 한다. 본 연구에서는 측정자료의 동질성을 확보하기 위하여 표준적인 절차를 개발하여 사용하였으며, 아래와 같은 측정기준을 설정하여 측정하였다. 아래의 기준은 ISO의 불확실도 분석 기준과 동일한 기준이다.

- (1) 하상자료 취득을 위해 수심측정은 전체 하폭의 2%를 넘지 않는 간격으로 측정이 이루어져야 한다.
- (2) 수평 유속분포는 수심의 60%에 해당하는 지점에서 전체 하폭의 2%를 넘지 않는 간격으로 유속 측정이 이루어져야 하며, 한 측정점에서 평균유속을 취득하기 위하여 120초 이상 측정되어야 한다.
- (3) 추가적으로 측정동안 수위 변동 혹은 수리적인 특성 변화를 검토하기 위하여 참고 유속을 최심지점의 0.6d 에서 매 60초 마다 연속 측정이 이루어져야 한다.

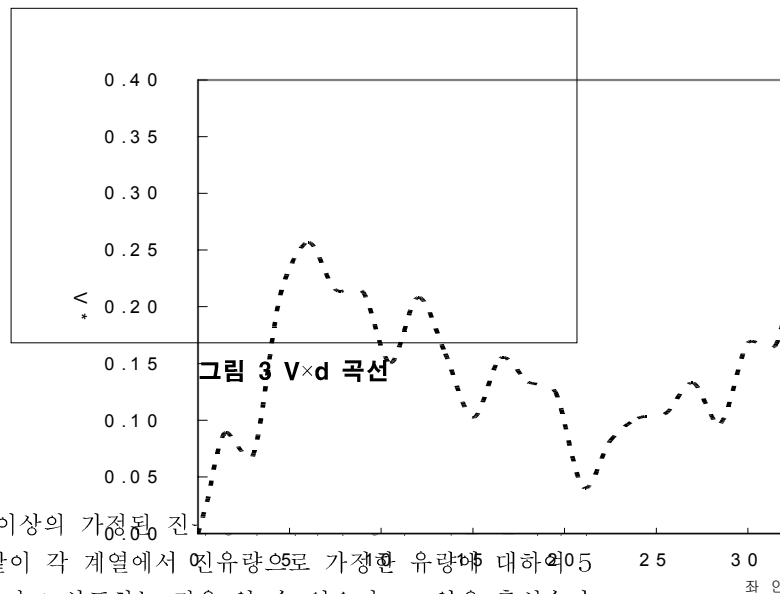
위 기준에 따라 9개 하천을 선택하여, 총 19회에 걸쳐 측정을 수행하였다. 지점선택에 있어 유량규모와 유속범위, 하상재료 특성을 고려하였다. 유량규모별로 보면 10m<sup>3</sup>/s 이하가 4회이며, 10m<sup>3</sup>/s ~20m<sup>3</sup>/s 유량범위를 갖는 지점은 11회 측정되었고, 20m<sup>3</sup>/s 이상은 3개 지점에서 4회 측정되었다. 수심규모로는 1m 내의이며, 팔당지점은 4.0~6.0m의 수심규모를 나타냈다. 하상재료는 호박돌, 자갈, 모래 등으로 이루어진 지점이 고루 분포하고 있다.

### 3.2 자료 분석

유량계산은 보다 정확한 방법으로 알려진 중간단면법을 이용하여 산출하였다. 50개 이상의 측선에서 측정된 자료를 이용하여 계산한 유량을 진유량으로 가정하였다.

측선 선택 방법은 등유량법에 의해 이루어졌다. 즉 등유량법은 각 구간유량의 크기가 같다는 것을 의미한다. 하지만 유속 및 수심의 분포가 불규칙하기 때문에 정확하게 각 구간의 유량이 일치하도록 측선을 선택하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 그림3과 그림 4와 같이 V\*d 곡선과 누가 유량곡선비에 의해 정해진 구간유량비에 해당하는 측선을 선택하는 방법을 활용한다. 예를 들면 그림 4에서와 같이 10개의 측선을 선택할 경우 각 구간의 유량은 10%에 해당할 것이다. 이를 누가 유량비에서 해당하는 유량%를 구한 후 그림 3의 이에 해당하는 측선을 선택하여 유량을 산정하면 된다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 누가유량비가 50%에 해당하는 5번째 측선은 40m에 해당하는 측선을 선택하면 된다.

위의 방법에 의해 측선을 감소시켜서 마찬가지로 중간단면법에 의해 유량을 산정하였고, 이 결과를 이용하여 가정된 진유량에 대한 상대오차 분석과 불확실도 분석을 시행하였다.



### 3.3 제한된 측선수에 따른 상대오차 분석

각각 주어진 측선수에 따라 산정된 유량을 50측선 이상의 가정된 진유량과 비교하여 결과를 그림 5에 나타냈다. 그림에서 볼 수 있는바와 같이 각 계열에서 연유량으로 가정된 유량에 대하여 0.5개의 측선을 선택하였을 경우 대략 ± 20%의 범위를 가지고 산포하는 것을 알 수 있으며, 그 양은 측선수가 증가하면서 감소한다. 각 측선수에 따른 평균 상대오차를 산출하여 그림 6에 도시하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 5개 측선 선택시 9.8%를 나타냈으며, 20개 측선 선택시 3.2%를 기록하였다. 25개 측선을 경과

하면서 2% 내외의 일정한 상대오차로 수렴해 가는 것을 볼 수 있다.

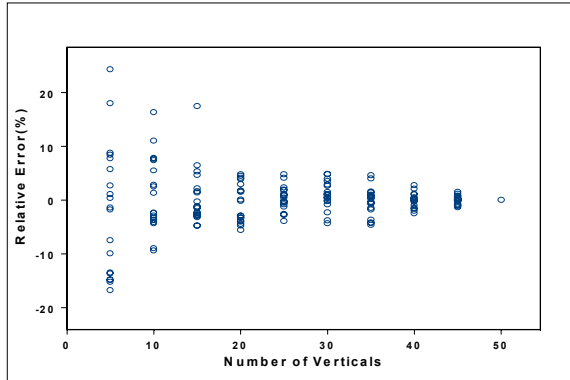


그림 5 측선수에 따른 상대오차 분포

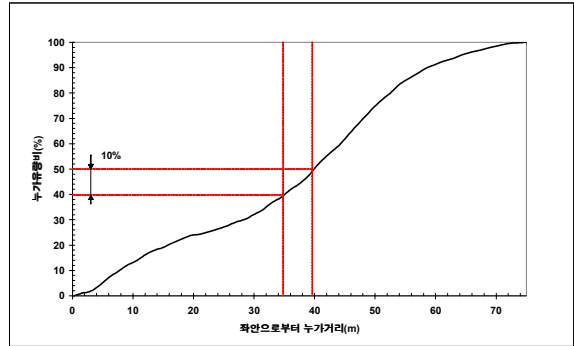


그림 4 누가 유량비(%) 곡선

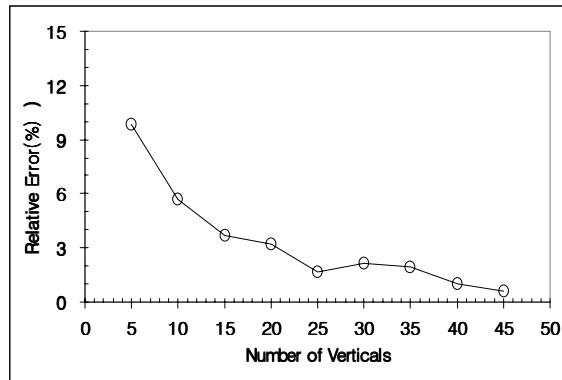


그림 6 측선수에 따른 평균상대오차(%)

### 3.4 불확실도 분석

개수로에서 유량 측정시 발생 가능한 오차를 고려할 경우 이러한 오차를 정확하게 예측하는 것은 가능하지 않지만, 측정된 유량에 대한 오차의 크기는 통계적 예측이 가능하다. 이와 같은 오차 크기에 대한 통계적인 예측을 측정에 대한 불확실도라 불린다.

예를들면 95% 신뢰수준에서 측정된 값의 불확실도는 한 값이 측정된 값으로부터 가감될 때 측정된 값의 주위에 20개 중 19개 측정값들의 평균이 참값을 포함하는 것이 기대되는 범위를 의미한다. 68%의 신뢰수준에서 측정 불확실도는 표준 불확실도라 불리며, 측정오차의 모든 요인들을 고려하면서 측정되는 양으로 가능한 모든 측정값의 모집단에 대한 표준편차로 간주된다. 68% 이외의 신뢰수준에 대하여는 확장된 불확실도라 불린다.

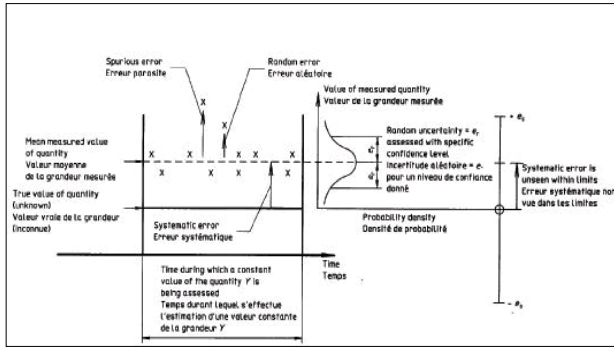


그림 7 오차의 구성

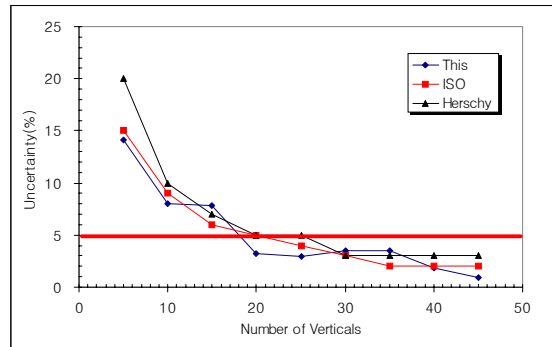


그림 8 불확실도 비교도

그림 7에서 볼 수 있는바와 같이 무작위 불확실도(Random Uncertainty)는 식(3)에서와 같이 표준편차에 곱정통계량을 곱한 값으로 정의된다.

$$(e_r) = \pm ts_Y \quad (3)$$

여기에서 표준 불확실도(standard uncertainty)  $s_Y$  는 식(4)과 같이 정의된다.(Herschy, 1999)

$$S_Y = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{N-1} \right]^{1/2} \quad (4)$$

본 연구에서 구한 불확실도 값은 표 2와 같이 나타났다. 이 결과를 ISO, Herschy의 결과와 비교하여 그림 8에 도시하였다. 표와 그림에서 확인할 수 있는바와 같이 20측선 이상에서 불확실도 값이 5%이하로 급격히 내려가 일정한 값으로 수렴되는 것을 볼 수 있다.

따라서 유량측정시 적절한 오차범위 내에서 유량측정이 수행되기 위해서는 20측선 이상을 선택하는 것이 타당할 것으로 여겨진다.

표 2 불확실도값 비교

#### 4. 불확실도 분석 결과의 활용

위에서 계산된 제한된 측선수에 따른 불확실도는 식 (5)에 제시하고 있는 불확실도는 평방자승근의 결합식에 적용되어 개별 유량측정의 전체 불확실도 산정에 적용된다. 식(5)에 의해 계산된 불확실도는 현장 유량측정에서 측선수, 측정수, 측정시간 등을 결정하는 기준이 될 수 있으며, 불확실도의 산정 결과를 이용하여 유량측정의 일관된 품질관리가 가능하다. 이러한 품질관리를 통하여 유량측정의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

No. of Verticals	This	ISO	Herschy
5	14	15	20
10	8	9	10
15	8	6	7
20	3	5	5
25	3	4	5
30	4	3	3
35	3	2	3
40	2	2	3
45	1	2	3

$$X'_Q = \pm \sqrt{X_m^2 + \frac{\sum_1^m [(b_i d_i \bar{v}_i)^2 (X'_{bi}{}^2 + X'_{di}{}^2 + X'_{ei}{}^2 + X'_{\pi}{}^2 + X'_{\alpha}{}^2)]}{(\sum_1^m b_i d_i \bar{v}_i)^2}} \quad (5)$$

여기에서  $X'_{bi}$ 는 구간 폭 측정의 불확실도,  $X'_{di}$ 는 수심에 대한 불확실도,  $X'_{ei}$ 는 측정시간에 대한 불확실도,  $X'_{\pi}$ 는 측정수에 대한 불확실도,  $X'_{\alpha}$ 는 유속계 보정에서 생기는 불확실도,  $X'_m$ 는 측선수에 따른 불확실도이다.  $m$ 은 횡단면에서 측정 측선수이다.

#### 5. 결론

본 연구에서 유량측정에서 가장 많이 사용되는 유속-면적법에 있어서 정확도에 영향을 미치는 요소에 대해 조사·분석하고, 정확도 영향요소 중 가장 크게 정확도에 영향을 미치는 것으로 알려진 제한된 측선수

에 따른 불확실도 분석을 수행하였다. 분석결과 작은 측선수를 선택할 경우 정확도가 심각하게 낮아질 가능성이 있는 것으로 나타났다. 불확실도 분석결과 20측선 이상에서 5%이하로 불확실도가 나타나며, 그 이상에서 수렴되어가는 경향을 나타내 하천 유량측정 실무에서 20측선 이상의 측선을 선택하는 것이 비교적 정확하면서 경제적인 유량측정이 될 것으로 판단된다. 산정된 제한된 측선수에 따른 불확실도는 수심, 유속 등 다른 개별 불확실도 요소와 더불어 전체 불확실도로 산정되며, 산정결과를 이용하여 유량측정 성과의 품질 관리에 활용가능하다.

#### 감사의 글

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

#### 참고문헌

- ISO(1997). ISO748, Liquid flow measurement in open channels by velocity area methods
- ISO(1985). ISO1088, Liquid flow measurement in open channels by velocity area methods-Collection and processing of data for determination of errors in measurement
- Rantz and others(1982). Measurement and computation of streamflow : Volume 1. Measurement of stage and discharge, U.S. Geological Survey Water-supply Paper 2175.
- Sauer, V.B, and Meyer, R.W., 1992, Determination of error in individual discharge measurements, Open-File Report 92-144, U.S. Geological Survey.
- Patrice M. Pelletier(1988).Uncertainties in the single determination of river discharge : a literature review, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 15, no. 5, p. 834-850.