

# 저수심·저유속 지점에 대한 StreamPro ADCP의 적용성 평가

## Application of StreamPro ADCP at Station of Low Depth and Low Velocity

박석근\*·김치영\*\*·이충대\*\*\*·이진원\*\*\*\*·이금영\*\*\*\*\*

Park, Seok Geun·Kim, Chi Young·Lee, Chung Dae·Lee, Jin Won·Lee Geum Young

### 요 지

기존의 ADCP는 1m 이하의 저수심 지점에서 측정이 불가능하였으며, 유속계 측정장비는 저유속 지점에서 측정이 불가능한 경우가 많아 유량측정에 어려움을 겪는 경우가 많다. 최근 RDInstruments에서 제작한 StreamPro는 1m 이하의 수심, 0.1m/s 이하의 유속에서 측정이 가능하기 때문에 이를 이용하면 저수심, 저유속 지점에서 유량측정이 가능하다. ADCP를 이용한 측정의 경우 보다 정확한 측정성적을 얻기 위하여 유속의 50% 속도로 이동하며 측정하여야 하며, 4회 측정유량값의 상대오차가 5% 이내일 때 그 평균값을 측정치로 한다. 그러나 0.1m/s 이하의 유속이 나타나는 지점은 0.05m/s 이하의 속도로 이동하며 측정을 실시하여야 하며 이 경우 측정시간이 너무 길어지는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 StreamPro를 이용한 유량측정의 적용성 평가와 함께 적절한 신뢰도를 얻을 수 있는 실용적인 측정회수 분석을 실시하였다. StreamPro를 이용한 측정성적의 적용성을 평가하기 위하여 StreamPro와 동시에 Price 유속계 측정을 실시하여 이를 비교하였다. 실용적인 적정 측정회수 분석은 측정유량의 상대오차를 Student-t분포에 적용하여 불확실도값을 기준으로 분석하였다. StreamPro와 Price 유속계 측정성적을 비교한 결과, 평균 상대오차가 약 3.5%로 적절한 값을 나타냈으며, 저수심, 저유속 지점에서의 실용적인 측정회수는 약 11회로 나타났다.

**핵심용어 : StreamPro, ADCP, Student-t분포**

## 1. 서 론

하천의 유량은 다양한 하천관련 계획수립에 이용되고 있으며, 수위, 강우량 등의 자료와 함께 관련 연구에서 매우 중요한 가치를 지니고 있다. 이에 따라 2007년 유량측정 전문기관인 유량조사사업단을 출범하여 정확한 유량값 산정을 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

하천의 유량 측정을 위한 가장 대표적인 방법은 유속-면적법으로 하천 단면을 일정 구간으로 나누어 구간의 면적과 각 구간의 평균유속을 곱한 유량의 합으로 유량을 산정하는 방법이다. 평저수시 유량을 측정하기 위하여 가장 일반적으로 사용되어 오고 있는 다양한 유속계와 함께, 인력이나 비용이 적게 소요되면서도 신뢰도 높은 유량을 측정하기 위하여 최근에는 미국 등 유량측정의 선진국과 함께 우리나라에서도 ADCP 이용이 점차 확대되고 있다. 그러나 우리나라는 기후, 하천환경 등이 미국이나 유럽과는 다르기 때문에 ADCP를 이용한 유량측정을 외국과 동일하게 적용하는 것이 어려울 수 있으므로 ADCP를 이용한 유량측정의 적용

\*정회원·유량조사사업단 연구원 ·E-mail: dicast97@kict.re.kr - 발표자

\*\*정회원·유량조사사업단 연구개발실장·E-mail: cy\_kim@kict.re.kr

\*\*\*정회원·유량조사사업단 금강그룹장·E-mail: chungdea@kict.re.kr

\*\*\*\*정회원·유량조사사업단 유량조사실장·E-mail: [jwlee@kict.re.kr](mailto:jwlee@kict.re.kr)

\*\*\*\*\*정회원·유량조사사업단 연구원·E-mail: decider@kict.re.kr

성이나 적절성과 관련된 연구가 다양하게 진행되고 있다.(이찬주 외, 2004;이찬주 외, 2005)

기존에 해양 분야에서 먼저 이용되던 ADCP가 하천 유량측정에 이용된 것은 1980년대 말부터로 ADCP 장비의 다양성은 점차 확대되고 있다. StreamPro는 RDI사에서 제작한 저수심용 ADCP로 우리나라에서는 현재까지 이와 관련된 연구가 없다. 본 연구에서는 저수심, 저유속 지점에 대하여 StreamPro와 기존 유량측정방법에 의한 결과를 비교하여 보고 StreamPro 측정의 적용성을 검토하여 보았다.

## 2. 저유속 지점에서 ADCP의 측정 기준

저수심, 저유속 지점의 경우 유량값 자체가 매우 작기 때문에 약간의 유량 편차는 상대오차로 판단할 때 매우 크게 나타나게 된다. 기본적으로 ADCP를 이용한 측정시 유의하여야 할 기준은 다음의 세 가지이다. 첫째, 신뢰도 높은 ADCP 유량 측정 결과를 얻기 위하여 일정 횟수를 반복 측정한 결과를 평균하여 유량값으로 결정하는데 권장하는 반복 회수는 측정 유량의 상대오차가 5% 이내일 경우 4회(이찬주1, 2005)이다. 둘째, 하천 유속의 50%로 ADCP를 이동하면서 측정하여야 정확한 결과를 얻을 수 있다. 마지막으로 ADCP를 이용한 측정 성과 품질 향상을 위해서는 반복 측정 회수보다 측정 시간을 늘리는 것이 더 유리하다(Kevin Obeg, 2007). 이 세 가지 조건에 따라 측정을 실시한다면 높은 품질의 ADCP 측정 성과를 얻을 수 있으나, 실제 저유속이 나타나는 지점에서는 ADCP 이동 속도나 측정 시간의 기준을 만족시키면서 측정하는 것이 매우 어렵다. 예를 들어 수면폭이 50m, 평균 유속이 0.01m/s인 지점에서 하천 유속의 50%로 측정할 경우 측정시간이 2시간 이상 걸리게 되고, 평균 유속이 0.05m/s인 지점이라면 1회 측정 시간이 5시간 이상 소요된다. 하천 유속의 100%로 측정을 한다고 하더라도 최소 반복 회수인 4회 측정에 소요되는 시간이 4시간 이상 소요되기 때문에 측정이 진행되는 동안 흐름 상황 변화에 따른 오차가 더 커질 가능성이 매우 크다. 또한 유량측정을 실시하는 측정자에게도 4시간 이상의 측정은 쉽지 않다.

저수심, 저유속 지점의 측정을 위한 기존의 측정 장비는 프라이스 유속계, 프로펠러 유속계, FlowTracker, 마그네틱 유속계 등이 있으나 음파를 이용하는 FlowTracker를 제외한 모든 장비의 유속 측정 범위는 0.2m/s 이상으로 제시되어 있다. 프라이스(AA) 유속계의 경우 실제 하천에서 0.01m/s 이하의 유속에서는 측정이 불가능한 경우가 많다. 따라서 실제 국내 하천에서 빈번하게 나타나고 있는 0.01m/s 이하의 유속 범위에서는 기존의 측정 장비를 이용하여 측정하는 것이 매우 어렵다. StreamPro의 경우 모든 유속 범위에서 측정이 가능하지만 앞서 언급한 바와 같이 저유속 조건에서는 측정 기준을 만족시키면서 측정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 기존 측정 장비의 이용이 어려운 지점에 StreamPro를 이용하여 측정할 경우 ADCP의 일반적인 측정 시간, 이동 속도 기준보다 좀더 실용적인 측정 기준이 필요하며, 본 연구에서는 이 측정 기준에 대한 검토를 수행하였다.

## 3. StreamPro 측정성과 분석

### 3.1 측정성과 분석

본 연구에서는 강청, 용촌, 유성, 증평 수위관측소에서 StreamPro를 이용하여 총 201개 측정을 실시하였으며, 증평 수위관측소에서는 유속-면적법과의 유량 측정 결과 비교를 위하여 동일 일자에 측정을 병행하였다. 측정 결과 중 <표 1>에서와 같이 StreamPro와 프라이스 유속계의 측정 유량의 상대 오차는 5월 21일 측정 성과를 제외하고는 모두 5% 이내로 양호한 결과가 나타나고 있으며, 평균 상대 오차는 약 3.5%로 유사한 결과를 나타내고 있다. 5월 21일 측정 성과의 경우, 평균 유속이 약 0.053m/s이었으나 StreamPro의 이동 속도가 약 0.177m/s로 너무 빠르게 이동하였기 때문에 상대 오차가 크게 발생하였다. 평균 유속과 StreamPro 이동 속도가 5월 21일 측정 성과와 유사한 5월 22일 측정 성과의 경우에는 상대 오차가 0.51%로 작게 나타나고 있는데, 이는 5월 21일에 비하여 측정 회수가 적기 때문이며, 평균 유속이 0.112m/s, SteamPro 이동 속도가 0.123m/s였던 5월 16일 측정 성과의 경우 측정 회수가 40회임에도 불구하고 상대 오차가 0.87%로 매우 양호한 결과를 보여주고 있다. 이런 결과를 종합해 보면 평균 유속이 0.1m/s 이상인 지

점에서는 StreamPro 이동 속도가 빠르더라도 비교적 양호한 결과를 보여주는 것으로 판단되며, 0.1m/s 이하인 지점에서는 세심한 측정이 요구되는 것으로 판단된다.

표 1. 증평 지점 StreamPro 및 프라이스 유속계 유량측정성과 비교

| 측정 일자 | 평균 유속 (m/s) | StreamPro 평균이동속도(m/s) | 유량 (m <sup>3</sup> /s) |       | 측정회수(회)   |      | 상대오차 (%) |
|-------|-------------|-----------------------|------------------------|-------|-----------|------|----------|
|       |             |                       | StreamPro              | 프라이스  | StreamPro | 프라이스 |          |
| 03-25 | 0.043       | 0.138                 | 0.820                  | 0.756 | 4         | 1    | 4.06     |
| 03-26 | 0.038       | 0.080                 | 0.653                  | 0.625 | 8         | 1    | 2.15     |
| 04-23 | 0.043       | 0.103                 | 0.370                  | 0.402 | 28        | 1    | 4.10     |
| 05-16 | 0.112       | 0.123                 | 0.613                  | 0.624 | 40        | 1    | 0.87     |
| 05-21 | 0.053       | 0.177                 | 1.083                  | 1.336 | 32        | 1    | 10.48    |
| 05-22 | 0.046       | 0.177                 | 0.880                  | 0.889 | 7         | 1    | 0.51     |
| 05-28 | 0.045       | 0.028                 | 0.975                  | 1.027 | 4         | 1    | 2.60     |

### 3.2 측정회수 분석

#### 3.2.1 작은 N을 갖는 단일샘플에 대한 참값의 범위 추정방법

얻을 수 있는 데이터의 수가 제한되는 경우에는 참된 산술평균값  $\bar{X}$  '을 얻지 못하여 참된 표준편차 값도 구하지 못하므로 편차( $X_i - \bar{X}'$  : deviation) 대신 잔차( $X_i - \bar{X}$  : residual)의 개념을 적용하여 다음의 식에서와 같이 단일 샘플에 대한 표준편차를 구하여 신뢰구간의 추정에 이용한다.

$$S = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2}$$

이 식에서  $\bar{X}'$  대신  $\bar{X}$ 를 사용하여 발생하는 “negative bias”를 보상하기 위하여 N 대신 (N-1)이 사용되었으나 이와 같은 또 다른 bias가 작은 수의 샘플에 대한 표준편차에 상존하며, 그 결과 무한대의 측정치에 대한  $\sigma$ 의 값과 일치하지 못하는 결과를 초래한다. 이와 같은 결점을 해결하기 위하여 영국의 W.S.Gosset가 “Student t분포”라고 하는 보상값을 제시하였다. 이 값은 자유도(degree of freedom) v 및 목적으로 하는 신뢰도 또는 확률에 따라 다른 값을 갖게 된다. 일반적으로 사용되는 데이터의 수가 작을수록 표준편차의 값이 과소평가되며 이 영향을 줄이기 위하여는 신뢰구간을 늘려야 하며 Student t분포는 이와 같은 역할을 행한다. 자유도는 일반적으로 계측횟수에서 통계량의 계산에 사용된 상수의 수를 뺀 값이며 상기의 식에서 (N-1)이 사용된 것은 이와 같은 이유에서이다.

단일의 계측치 X에 대하여 참값의 범위를 S 및 t를 이용하여 표현하여 보면,

$$\bar{X}' = X \pm t_v S \quad (\text{to given probability})$$

와 같이 된다. 첨자 v 는 S에 있어서의 자유도를 의미한다.

#### 3.2.2 측정회수 분석 방법

앞서 언급한 바와 같이 저유속, 저수심 지점에서는 하천 유속의 50%의 속도로 ADCP를 이동하여 측정하는 것이 현실적으로 어려울 뿐더러 유량값 자체가 작기 때문에 유량값의 상대 오차를 5% 이내로 확보하는데 매우 큰 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 총 201개의 유량 측정 성과를 이용하여 StreamPro의 적정 측정 회수를 분석하여 보았다.

평균 유속 0.1m/s 이하인 지점을 저유속 지점의 기준으로 하였으며, 최소 StreamPro 이동 속도에 따라

다른 결과가 나타날 것으로 판단되지만, 본 연구에서는 측정 성과들의 경우 현장 상황에 따라 실용적인 StreamPro 이동 속도로 측정된 성과들로 보고 StreamPro 이동 속도와 상관없이 모든 성과를 이용하였다. 측정 회수 분석 과정은 <그림 1>과 같이 먼저 동일 일자에 연속적으로 측정된 유량 중 저유속 지점 기준을 만족하는 성과를 2개부터 30개까지 순차적으로 평균치를 산정하고 이들 유량값의 상대 오차를 산정한다. 각각의 산정된 상대오차 값들은 무차원이며 특정치에 대한 오차값이므로 단일 샘플로 볼 수 있으므로, 앞서 설명한 참값의 범위 추정 방법으로 범위를 추정할 수 있다. 마지막으로 이 범위값이 5% 이내가 되는 적정 측정 회수를 결정하였다.

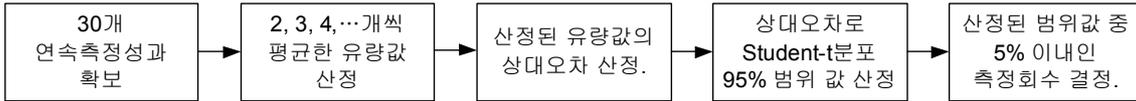


그림 3. 측정회수 분석 순서도

### 3.2.3 측정회수 분석 결과

강청, 용촌, 유성, 증평 수위관측소에서 총 201개의 측정성과 중 저유속 지점 조건을 만족하는 147개의 측정성과를 이용하여 각각 <그림 1>과 같은 과정으로 분석을 실시하였다. 동일 일자에 대한 각각의 성과들을 모두 취합한 후, 참값 범위 추정방법에 의하여 산정된 적정 측정 회수는 <표 2>와 <그림 3>과 같이 약 11 회로 결정되었다. 이는 최소 11회 이상 반복 측정한 유량값을 평균하여 사용할 경우, 참유량값에서 5% 이내의 오차 범위를 가지게 된다는 의미를 가진다.

표 2. 측정회수별 상대오차를 이용한 t분포 95% 오차범위 산정결과

| 측정회수 | 평균    | t분포값   | 오차범위   | 측정회수 | 평균    | t분포값   | 불확실도  | 측정회수 | 평균    | t분포값   | 불확실도  |
|------|-------|--------|--------|------|-------|--------|-------|------|-------|--------|-------|
| 2    | 9.59% | 1.9796 | 17.92% | 12   | 3.73% | 2.0117 | 3.64% | 22   | 2.21% | 2.1098 | 3.04% |
| 3    | 7.67% | 1.9816 | 12.84% | 13   | 3.21% | 2.0154 | 3.23% | 23   | 2.13% | 2.1314 | 2.96% |
| 4    | 5.96% | 1.9840 | 10.50% | 14   | 3.01% | 2.0195 | 3.10% | 24   | 1.95% | 2.1604 | 3.05% |
| 5    | 5.50% | 1.9876 | 9.38%  | 15   | 2.70% | 2.0244 | 3.49% | 25   | 1.71% | 2.2010 | 2.84% |
| 6    | 5.18% | 1.9917 | 7.82%  | 16   | 2.79% | 2.0301 | 3.26% | 26   | 1.55% | 2.2622 | 2.91% |
| 7    | 4.89% | 1.9955 | 6.86%  | 17   | 2.52% | 2.0369 | 3.43% | 27   | 1.35% | 2.3646 | 2.62% |
| 8    | 4.88% | 2.0010 | 6.43%  | 18   | 2.46% | 2.0452 | 3.13% | 28   | 1.38% | 2.7764 | 2.08% |
| 9    | 4.43% | 2.0032 | 6.45%  | 19   | 2.25% | 2.0555 | 3.22% | 29   | 0.86% | 3.1824 | 2.72% |
| 10   | 4.29% | 2.0057 | 5.77%  | 20   | 2.26% | 2.0687 | 3.19% | 30   | 0.62% | 4.3027 | 0.96% |
| 11   | 4.03% | 2.0086 | 4.69%  | 21   | 2.34% | 2.0930 | 2.95% |      |       |        |       |

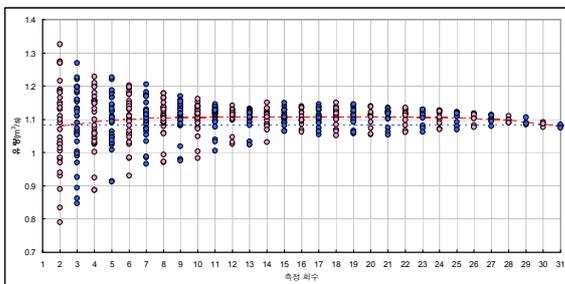


그림 4. 측정 회수별 유량값 산정 (증평 5월 21일)

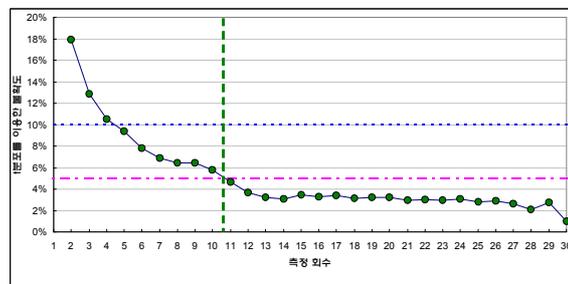


그림 5. 측정회수별 불확도 분석 결과

## 4. 결론

본 연구에서는 저수심, 저유속 지점에 대하여 저수심 ADCP인 StreamPro의 적용성 및 실용적인 적정 측정회수를 평가하였다. 기존의 유속-면적법에서 이용한 프라이스 유속계와 StreamPro의 유량 비교 결과, 비교적 유사한 유량값을 보이고 있어 StreamPro를 이용한 측정이 적절한 것으로 판단된다. 다만 평균 유속이 0.1m/s 이상에서는 StreamPro 이동 속도와 상관없이 프라이스 유속계와 유사한 유량을 나타내지만, 0.1m/s 이하에서는 StreamPro 이동 속도가 빠를 경우 유량의 오차가 크게 발생하는 것으로 분석되었다. 저유속 지점 기준을 0.1m/s 이하로 결정하고 적정 측정 회수 분석을 실시한 결과, 적정 측정 회수는 약 11회로 나타났다. 본 연구에서는 소수의 측정 성과를 이용하여 분석을 실시하여 이를 측정 기준으로 제시할 수는 없으나 향후 다양한 조건에서 다수의 StreamPro 측정 성과를 확보한다면 측정 기준이 될 수 있는 측정 회수를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

지금까지 국내에서는 저수심, 저유속 지점의 경우 대부분 프라이스 유속계나 프로펠러 유속계를 이용하여 유량 측정을 실시하였다. 비록 소수의 측정을 실시한 결과이지만, StreamPro를 이용한 측정은 적절한 유량 자료를 보여주고 있으며, StreamPro는 프라이스나 프로펠러 유속계를 적용할 수 없는 유속 범위까지 측정이 가능하기 때문에 향후 매우 유용한 측정 장비가 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 이영호(1998), 계측에 있어서의 불확실성 해석기법의 개요 및 적용 -ASME 제안기법을 중심으로-, 대한기계학회 유체공학부문 학술강연회 강연집
2. 이찬주1, 김동구, 김치영, 김원(2005), 국내 하천에서 ADCP에 의한 하천유량측정의 적용성과 효율성 검토, 한국수자원학회 2005년도 학술발표회 논문집
3. 이찬주2, 김원, 김치영, 김동구(2005), ADCP를 이용한 유량 측정의 원리와 적용, 한국수자원학회지
4. Kevin O. and David S. M., M.ASCE(2007). "Validation of Streamflow Measurements Made with Acoustic Doppler Current Profilers" Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133, No. 12
5. Muste, M, Yu, K., Spaspjevic, M.(2004), "Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics:part I:moving-vessel measurements"
6. RDI(2003), Winriver User's Guide International Version, RD Instruments. San Diego, CA
7. RDI(2006), StreamPro ADCP Operation Manual, RD Instruments. San Diego, CA