

실무 적용성이 용이한 간편 유속 산정식 제안

추태호* · 서종철** · 최현구** · 전근학**†

*부산대학교 사회환경시스템공학과

**부산대학교 건설융합학부 토목공학전공

A Proposal for Simplified Velocity Estimation for Practical Applicability

Tai-Ho Choo* · Jong-Cheol Seo** · Hyeon-Gu Choi** · Kun-Hak Chun**†

*Department of Social and Environmental System Engineering, Pusan National University, Korea

**Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, Korea

(Received : 2 March 2023, Revised : 13 March 2023, Accepted : 13 March 2023)

요약

하천의 유량 측정 자료는 수자원의 개발 및 유지, 하천 방재의 중요한 기초 자료로 이용되며, 홍수를 예측하고 예방하기 위해 홍수시 가장 정확하게 유량을 측정하는 것이 필요하다. 이에 미국지질조사국(USGS)은 오래전부터 기존의 간편 유속측정법으로 1점법, 2점법, 3점법을 제안하여 지금도 많이 사용하고 있으나, 보다 더 간편하고 신뢰할 수 있는 평균유속 산정 방법을 실무에서 요구하는 추세이나 이에 대한 이론적 기반의 실무 적용성 연구는 다소 미진한 상태이다. 이를 위하여 본 연구에서는 확률론적 엔트로피 개념을 활용하여 기존의 한계를 보완할 수 있는 실무 적용성이 용이한 간편 유속 산정식을 제안하였다. Coleman과 Flume 실측자료에 적용하여 식의 효용성을 입증하였다. 분석 결과, Flume Data의 경우, 실측값 대비 기존의 USGS 1점법은 평균 7.6%, 2점법은 8.6%, 3점법은 8.1%였다. Coleman Data의 경우, 1점법은 평균 5%, 2점법은 5.6%, 3점법은 5.3%의 오차율을 나타냈다. 반면에 엔트로피 개념을 활용한 제안식은 Flume Data는 실측값 대비 1점법은 평균 4.7%, 2점법은 5.7%, 3점법은 5.2%로 나타나 기존의 방법 대비 오차율을 약 60%정도 감소하는 것으로 나타났다. 또한, Coleman Data의 경우에서도 1점법은 평균 2.5%, 2점법은 3.1%, 3점법은 평균 2.8%의 오차를 보여, 기존의 방법 대비 오차율을 약 50%정도 줄이는 것으로 나타났다. 본 연구 결과에 의하면 기존의 1점법, 2점법, 3점법 보다 더 간편하면서 신뢰성 있는 평균유속을 산정할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 이는 향후 하천 설계, 운영관리, 특히 재난대비 예측관리 등 각종재난 대비 대응에 보다 유용하게 활용하려면 추가적으로 다양한 하천 실측을 통한 제안식의 지속적인 수정보완이 필요할 것으로 판단된다.

핵심어 : 엔트로피 이론, 유속공식, 1점법, 2점법, 3점법

Abstract

Data for measuring the flow rate of streams are used as important basic data for the development and maintenance of water resources, and many experts are conducting research to make more accurate measurements. Especially, in Korea, monsoon rains and heavy rains are concentrated in summer due to the nature of the climate, so floods occur frequently. Therefore, it is necessary to measure the flow rate most accurately during a flood to predict and prevent flooding. Thus, the U.S. Geological Survey (USGS) introduces 1, 2, 3 point method using a flow meter as one way to measure the average flow rate. However, it is difficult to calculate the average flow rate with the existing 1, 2, 3 point method alone. This paper proposes a new 1, 2, 3 point method formula, which is more accurate, utilizing one probabilistic entropy concept. This is considered to be a highly empirical study that can supplement the limitations of existing measurement methods. Data and Flume data were used in the number of holesman to demonstrate the utility of the proposed formula. As a result of the analysis, in the case of Flume Data, the existing USGS 1 point method compared to the measured value was 7.6% on average, 8.6% on the 2 point method, and 8.1% on the 3 point method. In the case of Coleman Data, the 1 point method showed an average error rate of 5%, the 2 point method 5.6% and the 3 point method 5.3%. On the other hand, the proposed formula using the concept of entropy reduced

† To whom correspondence should be addressed.

Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University, Korea

E-mail: ckh20003000@hanmail.net

- Tai-Ho Choo Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University, Korea/Professor(thchoo@pusan.ac.kr)
- Jong-Cheol Seo Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University, Korea/Ph.D Candidate(ss5828984@naver.com)
- Hyeon-Gu Choi Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University, Korea/Ph.D Candidate(wolfgeng9@naver.com)
- Kun-Hak Chun Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University, Korea/Ph.D Candidate(ckh20003000@hanmail.net)

the error rate by about 60% compared to the existing method, with the Flume Data averaging 4.7% for the 1 point method, 5.7% for the 2 point method, and 5.2% for the 3 point method. In addition, Coleman Data showed an average error of 2.5% in the 1 point method, 3.1% in the 2 point method, and 2.8% in the 3 point method, reducing the error rate by about 50% compared to the existing method. This study can calculate the average flow rate more accurately than the existing 1, 2, 3 point method, which can be useful in many ways, including future river disaster management, design and administration.

Key words : Entropy Theory, Velocity Equation, 1 Point Method, 2 Point Method, 3 Point Method

1. 서 론

하천의 유속을 측정하는 것은, 하천 단면에서 물의 흐름 양을 측정하는 것으로서, 유속을 정확하게 측정하여야만 하천 설계, 운영 및 유지관리, 상하수도 등 물관련 구조물 설계에 있어서 매우 중요한 항목이다. 이처럼 정확하고 신뢰성 높은 유속 자료는 수자원의 정량적인 계획과 관리를 위해서 필수적이지만 이러한 중요성에도 불구하고, 실제 실무에서는 아직도 기존의 1점, 2점 또는 3점 외에는 거의 적용하지 않고 있는 실정이다.

이러한 문제점은 무엇보다도 유량측정시기가 홍수기때 측정해야하고 현장까지 접근성이 더욱 어려운 한계성 때문이라 사료된다. 특히 집중호우에 야간 시간대라면 더욱 더 측정에 큰 어려움이 있음을 잘 알 것으로 사료 된다. 또한, 하천이 가지고 있는 다양한 지형적 특성이 불규칙한 지형들과 여러 수리수문학적 요소 및 변수들(2008년 곽승진, 2008년 노명근, 2009년 김진원)로 인해 아직까지도 하천의 유속을 간편하고도 신속하게 측정(2002년, 2009년, 2010년, 2013년 추태호 등)하기는 많은 어려움이 있다.

자연하천의 올바른 관리와 스마트한 물관리 시스템을 위해서는 기존의 수위관측소와 함께 취, 배수장을 포함한 수문학적 유량 자료가 필요하다. 하지만 지금으로서는 이러한 하천 취수량 자료가 실시간으로 제대로 관리가 되지 않는 실정이다. 그래서 효율적인 수자원 관리에 한계가 있다. 때문에 하천별로 주요 취수지점의 하수처리장 방류량 정보와 취수량을 실시간으로 공유하여 수자원 관리에 활용을 해야 할 것이다.

또한, 도시와 인구의 성장으로 인한 물 수요는 급격히 증가하고 있지만, 우리나라는 강수가 계절에 따라 편중되어 있는데 여름철인 6~8월에 강수가 집중되어 강수량이 부족한 계절에는 수자원량이 부족하다. 따라서 사용 가능한 수자원을 최대한 효율적으로 사용하기 위한 방안의 마련이 필요하다. 그래서 유역의 실시간 하천유량(2005년 오세승 등, 2010년 이천주 등)자료 수집이 중요하다고 판단된다.

객관적인 하천수 사용량 자료를 수집하기 위해서는, 각각의 용수별로 어느 정도의 규모 이상을 취수한 사용자가 그 사용량을 확인할 수 있는 계측시설을 설치하고 데이터를 기록 및 보관하며 사용계획과 실적을 홍수통제소장에게 보고하도록 하고 있다. 이러한 것들은 자료를 통해 하천의 수리학적 특성을 파악하기 위해서이다. 또한, 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 이론 및 실무적 측면에서 Chiu(1987년, 1989

년, 1992년, 1995년, 2002년, 2006년) 등은 기존의 결정론적인 흐름 방향 유속분포식의 한계를 극복할 수 있는 방법으로 확률통계에서 사용되는 엔트로피 개념을 이용한 2차원 유속분포식을 제안하여, 단면에서 유속이 동일한 점들을 연결하는 등유속선과 유속과의 일대일 대응 관계를 이용하므로 수면 아래에서 최대유속이 나타나는 실제 현상을 이론적으로 재현하였으며, 1998년 Chiu 등과 1998년 Araújo 등은 직사각형이나 사다리꼴과 같은 일정한 단면을 갖는 실험수로나 운하에서의 2차원 유속분포를 증명하였다. 국내에서도 효율적인 하천 유속측정을 위해 초음파유량계나 유속지수법과 같은 실시간 하천 유량 측정 방법들이 도입되어 실용중이다(2004년 김창완 등, 2006년 김치영 등). 그러나 점 유속계를 이용하여 하천 단면의 평균 유속을 얻기 위해서는 엄청난 시간과 노력이 필요하며, 측정 시간 동안의 흐름 상태와 측정 여건 변화를 고려하면 이러한 측정 자체가 극히 곤란하다(2014년, 2015년 차준호 등). 하지만 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)가 1980년대 말부터 하천 유량 측정에 도입되기 시작하면서 하천을 횡단함과 동시에 단면의 거의 대부분에 대해 유속분포를 측정할 수 있는 장점은 있으나 특히 현장 측정 및 실무적인 측면에서는 기존보다 좀 더 쉽고 간편하면서도 측정데이터에 대한 신뢰성을 보다 향상시킬 수 있는 방안이 좀 더 필요할 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 현장 측정의 용이성과 간편성이 우수한 기존의 USGS에서 제안하여 현재까지도 전 세계에서 가장 많이 실무에서 사용하고 있는 1점법, 2점법 및 3점법과 엔트로피 개념을 적용한 간편한 평균 유속 산정방법과 비교하여 그 효율성을 판단하고자 하였다. 이를 위하여 유도된 식들을 바탕으로 새로운 1점법, 2점법, 3점법 공식을 제시하였고, 제시된 식들의 타당성을 검증하기 위하여 기존의 많은 논문에서 인용하고 있는 1981년 Coleman과 1966년 Flume 등의 실측 자료를 적용하여 제안식의 활용성 여부를 판단하였다.

갈수기나, 홍수기에 측정하는 유속과 유량은 빠르고 정확한 것이 핵심이다. 그러나 홍수기 때 여러 지점과 많은 수직 지점을 빠르고 신속하게 정밀한 관측을 동시에 시행하는 것은 매우 어려운 일이다. 이러한 문제점을 해결하고자 미국 지질조사국(USGS)에서는 1점법, 2점법 및 3점법과 같이 의미 있는 특정한 지점을 측정하여 정확성과 신속성을 담보할 수 있는 방법을 제안하였으나 그 정확도는 다소 낮은 편이다. 따라서 본 연구에서는 엔트로피 개념을 기반으로 보다 더 간편하고 신뢰성있는 평균유속 측정 방법으로 실무적용성이 용이한 간편한 유속 산정식을 제안하고자 한다.

2. 이론고찰

2.1 기존의 간편한 평균유속 산정방법

기존의 간편 유속측정법인 1점법, 2점법, 3점법은 일반 유속계를 이용한 유량측정에서 일반적으로 사용되고 있다. 유속측정은 회전자가 소정의 위치에서 일정한 유속으로 회전하기 시작한 후 측정하여야 하며, 한 지점에서의 유속측정시간은 회전식 유속계의 경우 최소 40초, 전자기 유속계의 경우 최소 30초를 측정하여야 한다.

유속측정은 각 단면의 수심이 0.6m 이하 일 때에는 1점법, 0.6-1.0m일 때에는 2점법, 1.0m 이상일 때에는 3점법으로 평균유속을 구하되 각 지점별 2회 이상 측정한다.

유속측정시 1점법은 수면으로부터 수심(h)의 0.6h되는 위치에서, 2점법은 0.2h와 0.8h, 3점법은 0.2h, 0.6h 및 0.8h 되는 위치에서 유속을 측정한다. 2점법 측정 시 정상적으로 유속을 측정하였으나 측정 결과가 0.2(v) < 0.8(v) 이거나 0.2(v)=0.8(v)이 되는 경우에는 비정상적 유속분포를 보이는 경우이므로 0.6(v)을 측정하여 3점법으로 대체하여야 한다(Table 1).

2.2 새로운 간편 평균유속 산정방법

Chiu는 확률분포개념을 유속에 적용하여 식(1)과 같이 유속분포식을 제안하여, 최근까지도 많이 활용되고 있는 실정이다 (1987년, 1989년, 1992년, 1995년, 2002년, 2006년 Chiu 등).

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \left[\frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \right] \quad (1)$$

식 (1)에 평균유속을 반영한 유속분포식인 식 (2)와 같이 산정할 수 있다.

$$u = \frac{\bar{u}}{K(M)} \ln \left((e^M - 1) \left(\frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right) + 1 \right) \quad (2)$$

여기서, $\xi = (y/D - h) \exp \left(\frac{1 - y/D - h}{D - h} \right)$, h 는 수표면에서부터 최대유속이 발생하는 지점까지의 거리,

$\xi_{\max} - \xi_0 \approx 1$ 에 가깝고, $\xi_0 \approx 0$ 에 접근하며. $K(M) =$

$(Me^M - e^M + 1)/(e^M - 1)$ 이다.

평균유속을 통한 유속분포를 나타낼 수 있는 식 (2)를 평균유속의 형태로 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\frac{\bar{u}}{u} = \frac{1}{K(M)} \ln \left[1 + (e^M - 1) \left(\frac{\xi_m - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right) \right] \quad (3)$$

여기서, $\xi_0 = 0, \xi_{\max} = 1$ 이므로 식(3)은 식(4)와 같다.

$$1 = \frac{1}{K(M)} \ln \left[1 + (e^M - 1)(\xi_m) \right] \quad (4)$$

식 (4)를 평균유속 발생지점 ξ_m 항으로 정리하면 식(5)와 같다.

$$\xi_m = \frac{e^{K(M)} - 1}{e^M - 1} \quad (5)$$

위의 식 (5)는 평균유속 발생지점을 3차원 좌표계로 나타낸 것이므로, 2차원 좌표로 변환하게 되면 \bar{y}/D 와 같고, 여기서 \bar{y} 는 평균유속 발생지점을 의미한다. 그러므로 식 (5)는 식(6)과 같다.

$$\xi_m = \frac{e^{K(M)} - 1}{e^M - 1} = \frac{\bar{y}}{D} \approx \exp(-1) \quad (6)$$

엔트로피 계수 M 에 따른 \bar{y}/D (평균유속 발생지점)변화는 Table 2와 같으며, M 은 유속분포에 가장 큰 영향을 미치는 매개변수이다. 1987년, 1989년 Chiu에 의하면, 이론적으로 $M \rightarrow 0$ 이면(엔트로피 함수는 최대값) 유속이 하상으로부터 최대유속 발생지점까지 증가하는 선형 유속분포를 나타내며, $M \rightarrow \infty$ 이면(엔트로피 함수는 최소치) 유속이 하상에서 수표면까지 일정한 등분포한 유속분포($\bar{u}/u_{\max} = 1$, 즉 평균유속과 최대유속이 같다)를 나타내며, $0 < M < \infty$ 이면 포물선 유속분포를 나타낸다. 실제 하천의 흐름상태에서는 일반적으로 엔트로피 매개변수 M 이 5 이상의 값을 갖는데, 이 경우 대부분 하천의 물 흐름상태가 난류 흐름이다.

Table 1. Calculation of Average Velocity by Water Depth

| No. of Measurement Point | Water Depth Range (m) | Observation Spot (from the water surface) | Average Velocity (\bar{V}) |
|--------------------------|-----------------------|---|---|
| 1 | 0 ~ 0.6 | 0.6D | $\bar{V} = V_{0.6D}$ |
| 2 | 0.6 ~ 1.0 | 0.2D, 0.8D | $\bar{V} = 0.5(V_{0.2D} + V_{0.8D})$ |
| 3 | 1.0 < | 0.2D, 0.6D, 0.8D | $\bar{V} = 0.25(V_{0.2D} + 2V_{0.6D} + V_{0.8D})$ |
| 5 | 6.0 < | from water surface 0.3m 0.2D, 0.6D, 0.8D, from water bed 0.3m | $\bar{V} = 0.1(VS + 3V_{0.2D} + 2V_{0.6D} + 3V_{0.8D} + V_B)$ |

주) D : 수심, S : 수면으로부터 0.3m, B : 하상으로부터 0.3m

Table 2. Variation of Average Velocity Occurrence Point According to Entropy Coefficient M

| Entropy parameter_M | $\frac{\bar{y}}{D}$ |
|---------------------|---------------------|
| 1 | 0.460 |
| 2 | 0.425 |
| ... | |
| 5 | 0.373 |
| 9 | 0.368 |
| 13 | 0.368 |
| 20 | 0.368 |

따라서 본 연구에서는 이러한 하천의 난류 특성과 상기 식 (6)을 활용하여, M의 값이 5 이상일 경우 $\bar{y}/D=0.368$ 의 고정된 값을 가지는 것에 착안하여 기존의 1점법 측정지점 $\bar{y}/D=0.4$ 대신 사용하였으며, 2점법과 3점법에 활용되는 $\bar{y}/D=0.2$, $\bar{y}/D=0.8$ 의 비율을 반영하여 $\bar{y}/D=0.184$, $\bar{y}/D=0.75$ 를 2점법과 3점법으로 적용하였다(Table 3).

2.3 실측자료를 통한 분석 및 검증

2.3.1 Flume Data

본 연구에서는 Flume과 Coleman의 두 가지 데이터를 사용하였는데, 홍수시 발생 가능한 유사량을 함유하였기 때문에 선택하여 적용하였다. 유사입경이 0.19mm인 Flume 데이터는 1966년 Guy 등의 실험실 데이터를 사용하였는데, 사용된 수조 및 관련 장비는 콜로라도 주립 대학교의 유압 실험실에 있으며 하상 재료는 포트 콜린스에서 수백 마일 이내에서 발견된 천연 강모래를 사용하였다. 대부분의 데이

Table 3. New Point Velocity Measurement Point

| No. of Measurement Point | Measurement Spot of Existing Point Velocity | Suggested Point Velocity Measurement Spot |
|--------------------------|---|---|
| 1 | $\frac{\bar{y}}{D}=0.4$ | $\frac{\bar{y}}{D}=0.368$ |
| 2 | $\frac{\bar{y}}{D}=0.2, \frac{\bar{y}}{D}=0.8$ | $\frac{\bar{y}}{D}=0.184, \frac{\bar{y}}{D}=0.750$ |
| 3 | $\frac{\bar{y}}{D}=0.2, \frac{\bar{y}}{D}=0.4, \frac{\bar{y}}{D}=0.8$ | $\frac{\bar{y}}{D}=0.184, \frac{\bar{y}}{D}=0.368, \frac{\bar{y}}{D}=0.750$ |

터는 너비 8ft, 깊이 2ft, 길이 150ft의 재순환 수로에서 2개의 펌프와 배출 라인의 밸브 제어를 사용하여 $Q=0\sim 22$ (ft^3/sec)까지 변경하면 측정하였고 합판 수로의 기울기는 나사 잭으로 0에서 1.5%까지 조정할 수 있도록 하였다.

1981년 Coleman의 실험은 길이 15m, 폭 35mm의 유리 수로를 가진 재순환 수조에서 수행되었으며 균일한 흐름을 유지하기 위해 수로 기울기를 조정할 수 있도록 잭에 지지되었고, 흐름은 프로펠러 펌프에 의해 구동되었고, 유량은 수조의 리턴 수로 라인의 벤투리미터에 의해 측정하였다.

먼저 Flume 데이터를 기존 USGS와 제안식 (6)에 적용한 1점법, 2점법과 3점법을 적용한 대표적인 결과는 Fig. 1, 2와 같다. 기존 USGS와 제안식 (6)을 적용해서 20개의 실측치와 비교해 본 결과, 실측값 대비 기존의 1점법은 4.9%~11%, 2점법은 5.8%~12.6%, 3점법은 5.3%~11.8%의 오차를 나타냈다. 반면에, 엔트로피 개념을 활용한 제안식은 1점법은 2.5%~8.2%, 2점법은 3.7%~10%, 3점법은 3.1%~9.1%의 오차를 보여, 오차율만 비교해보면 기존

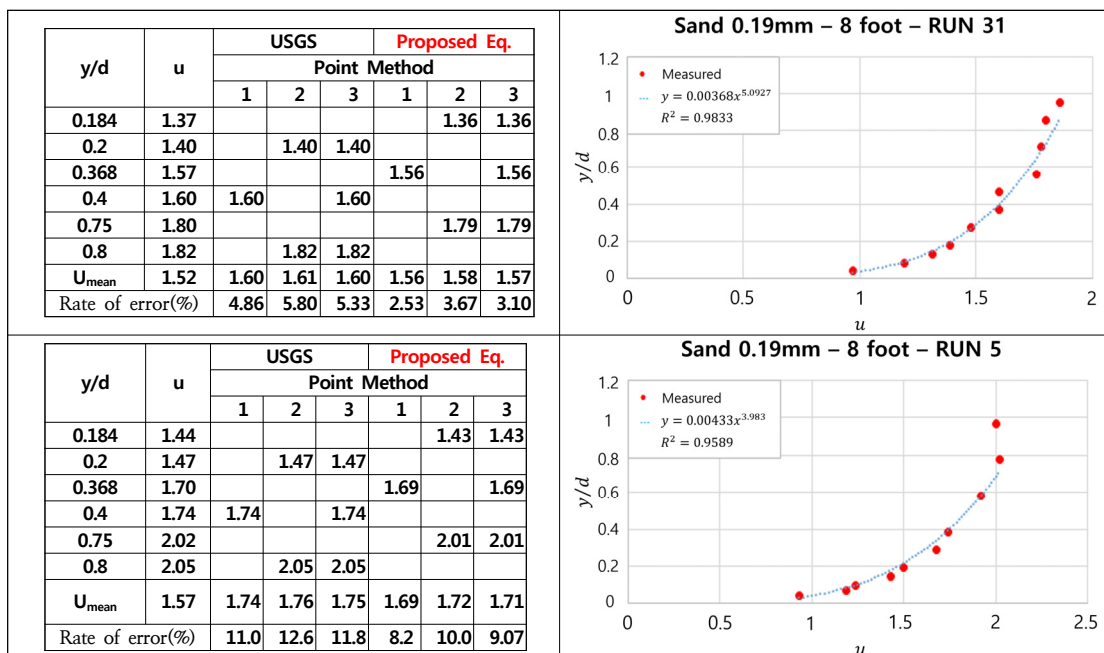


Fig. 1. Flume Data (1966) Analysis Result for Run 31 & 5

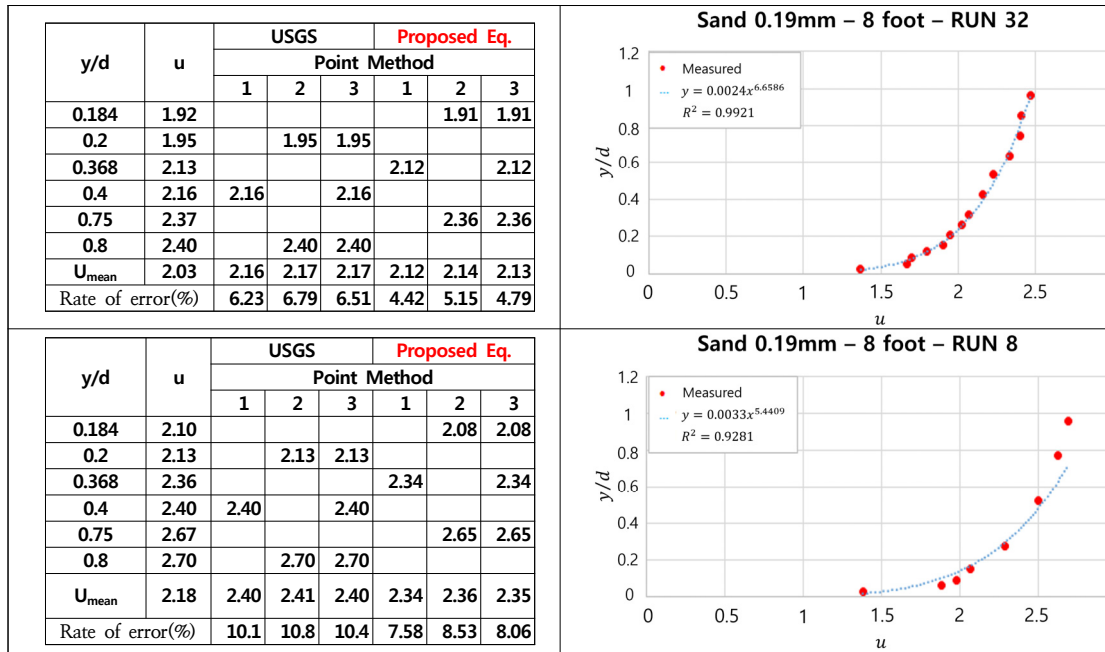


Fig. 2. Flume Data (1966) Analysis Result for Run 32 & 8

의 USGS방법보다 제안식이 50%~70%정도 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

또한, 3가지 유사입경(D=0.105, 0.21, 0.42mm)이 포함된 Coleman 데이터를 기존 USGS와 제안식 (6)에 적용한 1점법, 2점법과 3점법을 적용한 대표적인 결과는 Fig. 3, 4와 같다. 기존 USGS와 제안식 (6)을 적용해서 40개의 실측치와 비교해 본 결과, 실측값 대비 기존의 1점법은 4.1%~5.6%, 2점법은 4.5%~6.5%, 3점법은 4.3%~6.5%의 오차율을 나타냈다. 반면에 엔트로피 개념을 활용한 제안식은 1

점법은 1.9%~2.7%, 2점법은 2.4%~3.9%, 3점법은 2.2%~3.3%의 오차율을 보여, 오차율만 비교해보면 기존의 USGS 방법보다 제안식이 40%~60%정도 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

2.4 분석 결과

Fig. 1~4를 적용한 방법대로, 전체 데이터에 적용하여 산정한 결과를 각 데이터 별로 정리하였다.

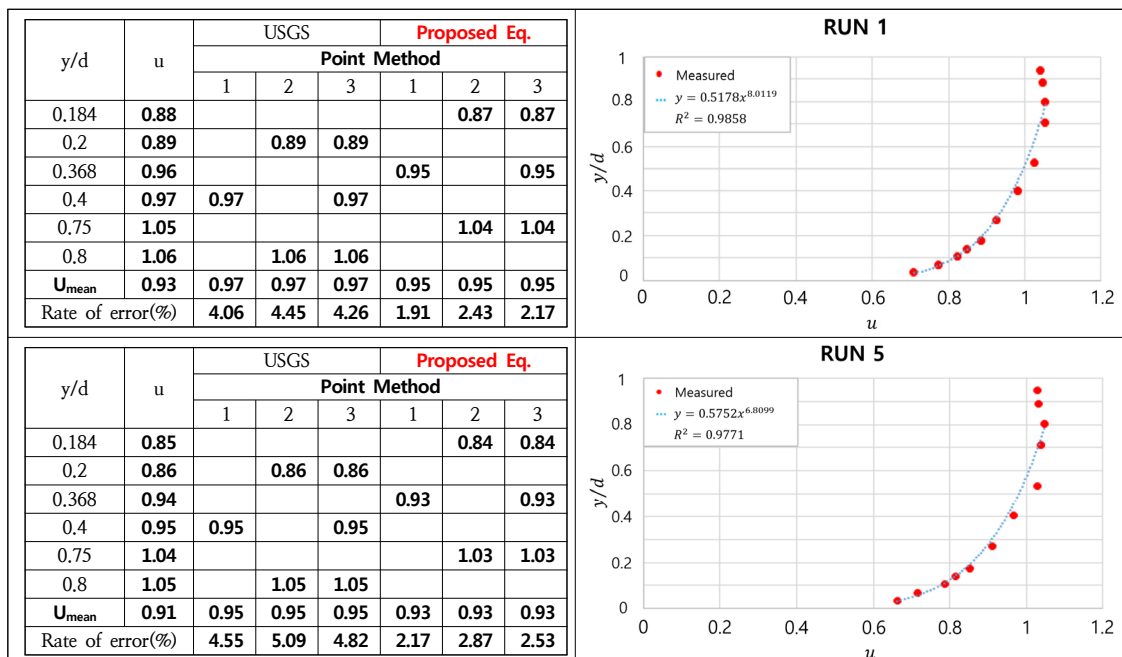


Fig. 3. Coleman Data(1981) Analysis Result for Run 1 & 5

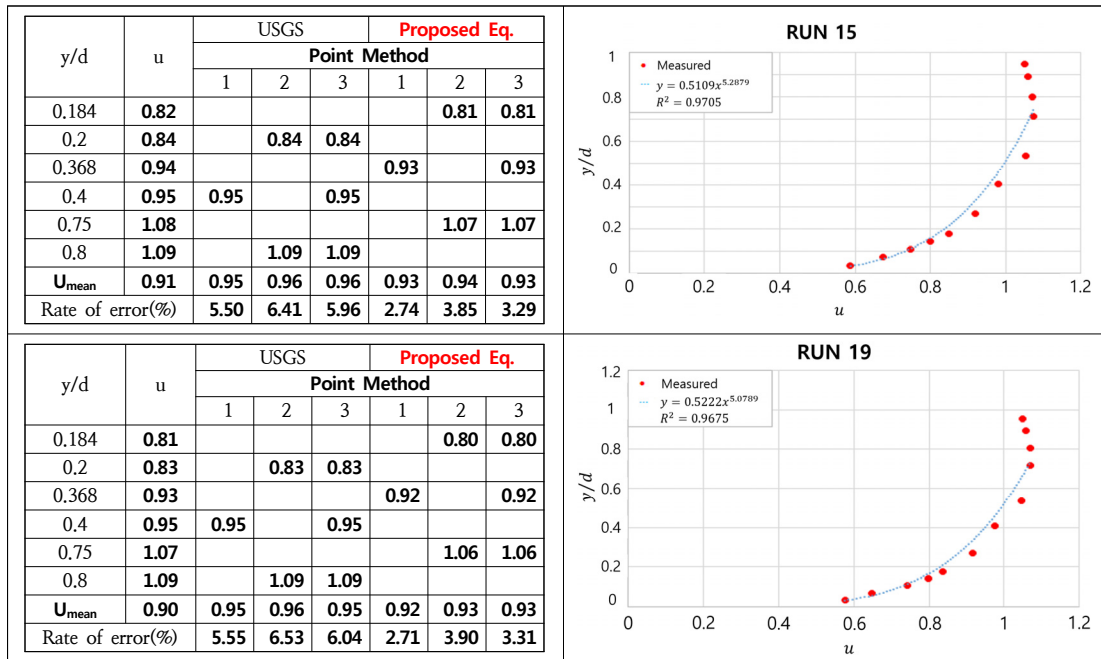


Fig. 4. Coleman Data(1981) Analysis Result for Run 15 & 19

2.4.1 Flume Data

Flume 데이터 전체 분석 결과는 Table 4와 같으며, 실측값 대비 기존의 USGS 1점법은 평균 7.6%, 2점법은 8.6%, 3점법은 8.1%의 오차율을 나타냈다.

반면에 엔트로피 개념을 활용한 제안식은 실측값 대비 1점법은 평균 2.5%, 2점법은 3.1%, 3점법은 평균 2.8%의 오차를 보여, 기존의 방법보다 오차를 약 60%정도 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

Table 4. Comparison of USGS, Proposed, Observed - Flume Data

| Order | USGS Method | | | Proposed Method | | | Observed (Um) |
|-------------------|-------------|------|------|-----------------|------|------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 1.34 | 1.35 | 1.34 | 1.29 | 1.30 | 1.30 | 1.25 |
| 2 | 1.31 | 1.32 | 1.32 | 1.26 | 1.27 | 1.27 | 1.21 |
| 3 | 2.90 | 2.91 | 2.91 | 2.86 | 2.86 | 2.86 | 2.79 |
| 4 | 3.45 | 3.47 | 3.46 | 3.39 | 3.40 | 3.40 | 3.29 |
| 5 | 3.44 | 3.56 | 3.50 | 3.31 | 3.43 | 3.37 | 3.10 |
| 6 | 3.89 | 3.93 | 3.91 | 3.80 | 3.83 | 3.82 | 3.61 |
| 7 | 1.97 | 1.97 | 1.97 | 1.92 | 1.93 | 1.93 | 1.94 |
| 8 | 3.32 | 3.38 | 3.35 | 3.21 | 3.27 | 3.24 | 2.87 |
| 9 | 2.18 | 2.22 | 2.20 | 2.10 | 2.14 | 2.12 | 2.04 |
| 10 | 2.01 | 2.04 | 2.02 | 1.94 | 1.97 | 1.95 | 1.87 |
| 11 | 2.09 | 2.10 | 2.09 | 2.05 | 2.05 | 2.05 | 2.06 |
| 12 | 4.25 | 4.28 | 4.26 | 4.16 | 4.19 | 4.17 | 3.91 |
| 13 | 3.29 | 3.31 | 3.30 | 3.23 | 3.24 | 3.24 | 3.08 |
| 14 | 2.75 | 2.79 | 2.77 | 2.67 | 2.71 | 2.69 | 2.58 |
| 15 | 1.14 | 1.14 | 1.14 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 1.08 |
| 16 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.16 | 1.16 | 1.16 | 1.14 |
| 17 | 1.52 | 1.53 | 1.53 | 1.48 | 1.49 | 1.49 | 1.46 |
| 18 | 1.73 | 1.73 | 1.73 | 1.69 | 1.69 | 1.69 | 1.58 |
| 19 | 1.98 | 1.98 | 1.98 | 1.94 | 1.94 | 1.94 | 1.91 |
| 20 | 2.11 | 2.15 | 2.13 | 2.03 | 2.07 | 2.05 | 1.73 |
| Average | 2.39 | 2.42 | 2.41 | 2.33 | 2.35 | 2.34 | 2.23 |
| Rate of error (%) | 7.55 | 8.63 | 8.09 | 4.70 | 5.67 | 5.18 | 0.00 |

Table 5. Comparison of USGS, Proposed, Observed - Coleman Data

| Order | USGS Method | | | Proposed Method | | | Observed (Um) |
|-------------------|-------------|------|------|-----------------|------|------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 0.97 | 0.97 | 0.97 | 0.95 | 0.95 | 0.95 | 0.93 |
| 2 | 0.96 | 0.97 | 0.96 | 0.94 | 0.95 | 0.95 | 0.93 |
| 3 | 0.95 | 0.96 | 0.96 | 0.93 | 0.94 | 0.94 | 0.91 |
| 4 | 0.95 | 0.96 | 0.96 | 0.93 | 0.94 | 0.94 | 0.91 |
| 5 | 0.95 | 0.95 | 0.95 | 0.93 | 0.93 | 0.93 | 0.91 |
| 6 | 0.95 | 0.95 | 0.95 | 0.92 | 0.93 | 0.93 | 0.90 |
| 7 | 0.95 | 0.96 | 0.95 | 0.93 | 0.93 | 0.93 | 0.91 |
| 8 | 0.94 | 0.95 | 0.94 | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0.89 |
| 9 | 0.94 | 0.95 | 0.94 | 0.92 | 0.93 | 0.92 | 0.90 |
| 10 | 0.95 | 0.96 | 0.95 | 0.93 | 0.94 | 0.93 | 0.90 |
| 11 | 0.96 | 0.97 | 0.97 | 0.94 | 0.95 | 0.94 | 0.92 |
| 12 | 0.94 | 0.94 | 0.94 | 0.91 | 0.92 | 0.92 | 0.89 |
| 13 | 0.95 | 0.95 | 0.95 | 0.92 | 0.93 | 0.93 | 0.90 |
| 14 | 0.96 | 0.95 | 0.96 | 0.93 | 0.92 | 0.93 | 0.90 |
| 15 | 0.94 | 0.95 | 0.95 | 0.94 | 0.93 | 0.93 | 0.91 |
| 16 | 0.95 | 0.96 | 0.95 | 0.91 | 0.93 | 0.92 | 0.90 |
| 17 | 0.96 | 0.95 | 0.95 | 0.92 | 0.94 | 0.93 | 0.90 |
| 18 | 0.94 | 0.95 | 0.95 | 0.93 | 0.93 | 0.92 | 0.89 |
| 19 | 0.95 | 0.95 | 0.95 | 0.94 | 0.93 | 0.93 | 0.90 |
| 20 | 0.96 | 0.95 | 0.95 | 0.91 | 0.92 | 0.92 | 0.90 |
| Average | 0.95 | 0.96 | 0.95 | 0.93 | 0.93 | 0.93 | 0.91 |
| Rate of error (%) | 5.01 | 5.55 | 5.27 | 2.45 | 3.09 | 2.77 | 0.00 |

2.4.2 Coleman Data

Coleman 데이터 전체 분석결과는 Table 5와 같으며, 실측값 대비 기존의 USGS 1점법은 평균 5%, 2점법은 5.6%, 3점법은 5.3%의 오차율을 나타냈다. 반면에 엔트로피 개념을 활용한 제안식은 실측값 대비 1점법은 평균 2.5%, 2점법은 3.1%, 3점법은 평균 2.8%의 오차를 보여, 기존의 방법보다 오차를 약 50%정도 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

하천의 유량 측정 자료는 수자원의 개발 및 유지, 하천 방재의 중요한 기초 자료로 이용되며 많은 전문가들이 보다 정확한 측정방안을 제시하기 위해 연구를 진행 중이다. 특히, 우리나라는 기후 특성상 여름철에 장마와 호우가 집중되어 홍수가 빈번히 발생한다. 따라서 홍수를 예측하고 예방하기 위해 홍수시 보다 간편하고 신속하면서도 신뢰성 있는 유량 측정이 필요하다. 그러나 현장에서 유량 측정시 무엇보다도 유량 측정시기가 홍수기때 측정해야하고 현장까지 접근성이 더욱 어려운 한계성 때문이라서 실제 실무에서는 아직도 기존의 1점, 2점 또는 3점외에는 다른 대안을 적용하지 않고 있는 실정이다. 특히 집중호우에 약간 시간때라면 측정에 큰 어려움이 있음을 잘 알 것으로 사료된다. 또한, 하천이 가지고 있는 다양한 지형적 특성인 불규

칙한 지형들과 여러 수리수문학적 요소 및 변수들로 인해 아직까지도 하천의 유속을 간편하고도 신속하게 측정하기는 많은 어려움이 있다.

상기의 대안으로 본 연구에서는 확률론적 엔트로피 개념을 활용하여 기존의 한계를 보완할 수 있는 실무적으로 이용이 간편한 유속 산정식을 제안하였으며 이를 Coleman (1981)과 Flume(1966)실측자료에 적용하여 제안식의 효용성을 입증하였다.

분석 결과 Flume Data의 경우, 실측값 대비 기존의 USGS 1점법은 평균 7.6%, 2점법은 8.6%, 3점법은 8.1%였으며, Coleman Data의 경우, 1점법은 평균 5%, 2점법은 5.6%, 3점법은 5.3%의 오차율을 나타냈다. 반면에, 엔트로피 개념을 활용한 제안식은 Flume Data의 경우, 실측값 대비 1점법은 평균 4.7%, 2점법은 5.7%, 3점법은 5.2%로 나타나 기존의 방법 대비 오차율을 약 60%정도 줄이는 것으로 나타났다. 또한, Coleman Data의 경우에서도 1점법은 평균 2.5%, 2점법은 3.1%, 3점법은 평균 2.8%의 오차를 보여, 기존의 방법 대비 오차율을 약 50%정도 줄이는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구 결과에 의하면 기존의 1점법, 2점법 3점법보다 제안식(6)이 간편하면서 보다 신뢰성 있는 평균유속을 산정할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 이는 향후 하천 설계, 운영관리, 특히 재난대비 예측관리 등 각종재난 대비 대응에 보다 유용하게 활용하려면 추가적으로 다양한 하천 실측을 통한 제안식의 지속적인 수정보완이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 과정은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- Araújo, J. C. D., Chaudhry, F. H. (1998). Experimental evaluation of 2-D entropy model for open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(10), pp. 1064-1067.
- Cha, J. H. (2015). *Development and application of velocity profile method with poisson equation*, Hanyang University, Doctoral Dissertation.
- Cha, J. H., Kim, C. W., Jo, Y. S. (2014). Development and application of constant velocity line using poisson equation. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 14(6), pp. 325-336.
- Chen, Y. C., Chiu, C. L. (2002). An efficient method of discharge measurement in tidal streams. *Journal of Hydrology*, 265(1-4), pp. 212-224.
- Chin, C. L., Murray, D. W. (1992). Variation of velocity distribution along nonuniform open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(7), pp. 989-1001.
- Chiu, C. L. (1987). Entropy and probability concepts in hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(5), pp. 583-599.
- Chiu, C. L. (1989). Velocity distribution in open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(5), pp. 576-594.
- Chiu, C. L., Chiou, J. D. (1989). Manning's equation and velocity distribution in open channels.
- Chiu, C. L., Hsu, S. M. (2006). Probabilistic approach to modeling of velocity distributions in fluid flows. *Journal of Hydrology*, 316(1-4), pp. 28-42.
- Chiu, C. L., Lin, G. F., Lu, J. M. (1993). Application of probability and entropy concepts in pipe-flow study. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(6), pp. 742-756.
- Chiu, C. L., Said, C. A. A. (1995). Maximum and mean velocities and entropy in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(1), pp. 26-35.
- Choo, T. H. (2002). Measurement of discharge using the entropy concept (II) - based on the surface velocity. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 22(4B), pp. 507-515.
- Choo, T. H., Chae, S. G., Yun, H. C., Yun, G. S. (2013). The estimation of river discharge by using the mean velocity equation in a unsteady condition, *Journal of Korean Society of Industrial Technology*, 14(12), pp. 6558-6564.
- Choo, T. H., Go, D. G., Lee, S. J. (2010). Estimation of river flow rate using mean flow formula, *Journal of the Korea Water Resource Association*, 43(3), pp. 265-273.
- Choo, T. H., Lee, S. J., Park, S. W., Oh, R. S. (2009). Estimation of rivers discharge by probabilistic velocity function considering hydraulic characteristics, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 29(6B), pp. 537-542.
- Choo, T. H., Ok, C. Y., Kim, J. W., Maeng, S. J. (2009). A study on the velocity distribution in closed conduit by using the entropy concept, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 29(4B), pp. 357-363.
- Coleman, N. L. (1981). Velocity profiles with suspended sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 19(3), pp. 211-229.
- Guy, H. P., Simons, D. B., Richardson, E. V. (1966). Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-61. US Government Printing Office. Sediment Transport in Alluvial Channels Geological Survey Professional Paper, pp. 462-1.
- Gwak, S. J. (2008). *A study on the application of Chiu flow rate distribution formula*, Pusan University, Master Thesis.
- Kim, C. W., Lee, M. H., Jung S. H., Min, I. H. (2004). Real-time stream measurement with ultrasonic current meter, *In Proceedings of the Korea Water Resource Association*, pp. 220-224.
- Kim, C. Y., Kim, W., Lee, C. J., Kim, D. G. (2006). Automatic discharge measurement using the velocity index method, *In Proceedings of the Korea Water Resource Association*, pp. 242-246.
- Kim, J. W. (2009). *A study on the estimation of average flow rate of channel water using Chiu flow rate formula*, Pusan University, Master Thesis.
- Lee, C. J., Kim, D. G., Kwon, S. I., Kim, W. (2010). Inter-comparison of accuracy of discharge measurement methods - a case study performed in the Dalcheon river downstream of the Goesan dam, *Journal of the Korea Water Resource Association*, 43(12), pp. 1039-1050.
- Noh, M. G. (2008). *A study on the equilibrium state of flow rate using entropy concept*, Pusan University, Master Thesis.
- Oh, J. S., Kim, B. S., Kim, H. S., Seoh, B. H. (2005). An estimation technique of flood discharge, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 25(3B), pp. 207-213.